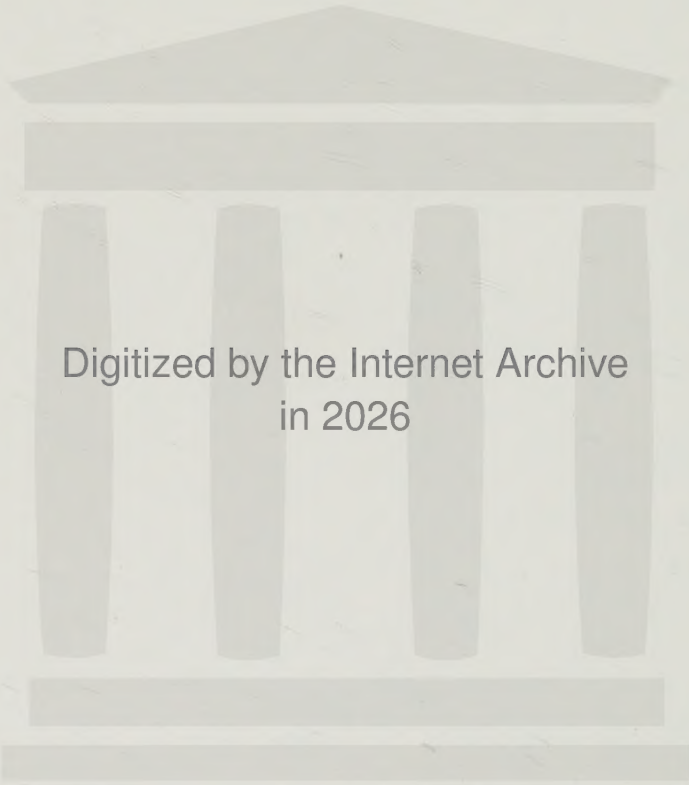


Experimentelle Untersuchungen und Berechnungen zur Tragfähigkeit, Konstruktion und Einbautechnologie von Zugankern im Schelfeis der Antarktis

Doktorarbeit
zur
Erlangung des Grades
Doktor-Ingenieur
der
Abteilung für Bauingenieurwesen
der Ruhr-Universität Bochum

von
Dipl.-Ing.
Harald Brühl
Duisburg

Bochum 1985



Digitized by the Internet Archive
in 2026

Experimentelle Untersuchungen und Berechnungen zur
Tragfähigkeit, Konstruktion und Einbautechnologie
von Zugankern im Schelfeis der Antarktis

Doktorarbeit

zur

Erlangung des Grades

Doktor-Ingenieur

der

Abteilung für Bauingenieurwesen

der Ruhr-Universität Bochum

von

Dipl.-Ing. Harald Brühl

Duisburg

Bochum 1985

Doktorarbeit eingereicht am: 23. Januar 1985

Tag der mündlichen Prüfung: 9. Mai 1985

Berichter:

o.Prof. Dr.-Ing. B. Maidl

o.Prof. Dr.-Ing. H.L. Jessberger

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einleitung	1
2. Die mechanischen Eigenschaften von Eis und Schnee	5
2.1 Die Physik des Eises	5
2.2 Die Dichte von Eis und Schnee und ihr Einfluß auf die Stoffeigenschaften	6
2.3 Die Temperatur des Schelfeises und ihr Einfluß auf die Stoffeigenschaften	9
2.4 Rheologische Eigenschaften von Eis und Schnee	11
2.5 Elastische Eigenschaften von Eis und Schnee	14
3. Verankerungsverfahren im Lockergestein und ihre Übertragung auf Eis und Schnee	18
3.1 Überblick	18
3.2 Verankerungen mit eingegrabenen Ankern	24
3.2.1 Verankerungsprinzip	24
3.2.2 Anwendung von eingegrabenen Ankern in Grönland	24
3.2.3 Anwendung eines "vorgespannten" Ankers in der Antarktis	28
3.3 Schraubenanker	31
3.4 Verpreßanker	32
3.4.1 Verankerungsprinzip	32
3.4.2 Anwendung des Verpreßankers im Lockergestein	33
3.4.3 Übertragung des Prinzips eines Verpreß- ankers auf Eis und Schnee	35
3.5 Bewertung und Aussagen zum derzeitigen Stand der Kenntnisse	35
4. Vorversuche in der Antarktis, auf der Zugspitze und im Labor	35
4.1 Vorversuche während der Antarktis-Expedition 1979/80	38

4.1.1 Allgemeines	38
4.1.2 Versuche zur Herstellung von Eisplomben	38
4.1.3 Versuche mit Toter-Mann-Ankern	40
4.2 Vorversuche auf dem Zugspitzplatt 1980	46
4.2.1 Allgemeines	46
4.2.2 Versuche zur Wahl eines Celluloseäthers	47
4.2.3 Erprobung einer Versuchseinrichtung	47
4.2.4 Messung der Gefrierdauer einer Eisplombe	49
4.3 Ergänzende Laborversuche zur Eisfestigkeit	50
4.4 Erste Ankerzugversuche während der Antarktis-Expedition 1980/81	51
4.4.1 Allgemeines	51
4.4.2 Ankerzugversuche mit eingegrabenen Ankern	53
4.4.3 Ankerzugversuche mit Schraubenankern	56
4.4.4 Ankerzugversuche mit Eisplombenankern	60
4.4.5 Zusammenfassung	65
5. Zugversuche mit Eisplombenankern während der Antarktis-Expedition 1982/83	67
5.1 Allgemeines	67
5.2 Versuche zum Versagensmechanismus	70
5.2.1 Versagensvorgang beim eingegrabenen Anker	70
5.2.2 Versagensvorgang beim Schraubenanker	70
5.2.3 Versagensvorgang beim Eisplombenanker	70
5.3 Langzeitversuche	76
5.4 Versuch zum Verhalten unter dynamischer Belastung	81
5.5 Versuche zur Konstruktion des Eisplombenankers	82
5.5.1 Überblick	82
5.5.2 Verankerungslänge und Eisplombendurchmesser	83
5.5.3 Ankerlänge	88
5.5.4 Ankerplattendurchmesser	92
5.5.5 Ankerneigung	92
6. Berechnung der Tragfähigkeit des Eisplombenankers	94
6.1 Ausgangspunkt der Berechnung	94
6.2 Verformung als Funktion der Zeit	94

6.3 Verformung in Abhängigkeit von der Anker- konstruktion	98
6.4 Bemessung des Eisplombenankers	101
6.5 Berechnung der Gefrierdauer der Eisplombe	105
7. Vergleich des Tragverhaltens des Eisplombenankers mit dem anderer Zuganker in Eis und Schnee	112
8. Zusammenfassung und Schlußbemerkungen	115
9. Literaturverzeichnis	120
10. Formelzeichen und Dimensionen	126
11. Lebenslauf	128



Bild 1-1: Schnee von Flughafen-Station

Befugnis der Kommission, die durch Befragungsfragen mit
anderen Befragungsfragen über die Befragungsfragen, die in den
Befragungsfragen der Kommission über die Befragungsfragen, die
Befragungsfragen und Befragungsfragen der Kommission über die Befragungsfragen

1. Einleitung

Abspannungen und Verankerungen von Gebäuden, Sende-, Observations- und Antennenmasten sowie Bohrtürmen oder sonstigen oberhalb der Schelfeisoberfläche liegenden Einrichtungen im Eis und Schnee der Antarktis gegen Belastungen aus Wind bereiten Probleme, die mit den z. Zt. verwendeten Verfahren nicht befriedigend gelöst werden können. Es wurden sowohl beim Aufbau der deutschen Georg-von-Neumayer-Station als auch bei allen im Bereich der Forschungsstation errichteten Einrichtungen fast ausschließlich Zugverankerungen verwendet (s. Bild 1.1), die auf dem Prinzip des "Toten Mannes (Dead Man)" basieren.



Bild 1.1: Georg-von-Neumayer-Station

Aufgrund der Kenntnisse, die durch Erfahrungsaustausch mit anderen Antarktisforschern oder durch Vorversuche z.B. in den Gletscherregionen der Alpen oder in Grönland vorlagen, konstruierte und dimensionierte man die Toten Männer so, daß sie

die auftretenden Beanspruchungen in der Regel aufnehmen konnten. Allerdings beruhten die Bemessungen dieser Zuganker weder auf Zugversuchen, wie sie nach DIN 4125 für Erdanker vorgeschrieben sind, noch auf systematischer wissenschaftlicher Erprobung, sondern nur auf groben Richtwerten, die sich im allgemeinen durch vergleichende Probebelastungen ergaben.

Das vom Lehrstuhl für Bauverfahrenstechnik und Baubetrieb geplante und durchgeführte Forschungsvorhaben "Zugverankerungen in Eis und Schnee" sah vor, speziell an die Bedingungen der Antarktis angepaßte Zugverankerungssysteme zu entwickeln und im Vergleich zu den herkömmlichen Ankern zu testen, Einbauverfahren zu erproben und zu verbessern sowie erstmals Grundlagen für die Bemessung von Zugverankerungen zu schaffen.

Dazu war es nötig, sich einen Überblick über die speziellen Probleme und Anforderungen des Baugrunds "Schelfeis" und über bisherige wissenschaftliche Untersuchungen über in Eis und Schnee verwendete Verankerungsverfahren zu verschaffen.

M.C. Hironaka hatte 1974 /26/ in Eis und Schnee angewandte Anker zusammengestellt. Er machte deutlich, daß gegenüber Ankern in Fels das viskoelastische Material Eis zu dem Problem der Ermittlung einer zulässigen Verformung im Verhältnis zur möglichen Lebensdauer führt. Aufnehmbare Belastungen müssen daher immer in Relation zu den Größen Verformung und Zeit stehen. Dimensionierungsvorschläge machte Hironaka jedoch nicht.

A. Kovacs untersuchte 1967 /36/ in Polarschnee eingegrabene Anker in Grönland über Jahre hinweg, um eine generelle Eignung solcher Anker nachzuweisen. Allerdings führte er keine definitive Bemessung oder Dimensionierung durch. Er stellte heraus, daß bei kurzzeitiger Belastung eine hohe Spitzenbelastung aufzunehmen ist, bei langandauernder Belastung aber

schon wesentlich geringere Belastung zu enormen Verformungen führt, so daß er sich damit begnügte, Verformungsgeschwindigkeiten zu messen. Diese Verformungsgeschwindigkeiten garantieren bei bestimmten Ankerkonstruktionen gewisse Dauerstandfestigkeiten.

Als eine Vorbereitung für Dimensionierung und Bemessung von Eisankern stellten A. Kovacs, S. Blouin, B. McKelvy und H. Connigan 1975 /38/ vorhandene analytische Verfahren zusammen, die für Erdanker die Bestimmung der Ankertragfähigkeit unter konstruktiven und bodenmechanischen Parametern ermöglichen. Es ist aber nicht möglich, mit einem Bemessungsansatz alle Parameter des Bodens und des Ankers zu erfassen; es müssen für jeden einzelnen Anker analytische Lösungen gefunden werden.

In Permafrostboden, der in seinem Verhalten Eis und Schnee ähnelt, führten G.H. Johnston und B. Ladanyi 1972 /32/ und 1974 /33/ Ankerzugversuche durch, die erstmals konkret mit Hilfe bekannter Kriechgesetze zur Voraussage von Tragfähigkeit bzw. Lebensdauer unter Berücksichtigung der Verformung führten.

Weitere Literatur über Ankerzugversuche in Eis und Schnee lag nicht vor, als 1979/80 die Forschungen in der Antarktis mit ersten in-situ-Versuchen aufgenommen wurden.

Es sollten möglichst in der Antarktis vorhandene Baumaterialien genutzt werden. Die Idee (basierend auf dem Prinzip eines Verpreßankers für Lockergestein), mit Wasser eine Ankerzugstange im Schelfeis festzufrieren, führte zur Konzeption des Eisplombenankers. Dieser Anker wurde nach Vorbereitung durch weitere Versuche im Labor und auf der Zugspitze während der Antarktis-Expedition 1980/81 an der Georg-von-Neumayer-Station im Vergleich zu je einer Version eines ein-

gegrabenen bzw. eines Schraubenankers getestet. Die besten Ergebnisse dieser Versuche zeigte dabei dieser neu entwickelte Eisplombenanker, der jeweils relativ höhere Belastbarkeit, geringere Verformungen und längere Lebensdauer aufwies.

So wurde im weiteren Verlauf des Forschungsprojekts der Schwerpunkt der Untersuchungen darauf gelegt, diesen speziell an die Bedingungen der Antarktis angepaßten Eisplombenanker weiterzuentwickeln und zu verbessern sowie eine Grundlage für seine Bemessung zu schaffen. In mehreren Versuchsreihen wurde im Verlaufe der Antarktis-Expedition 1982/83 dieser Eisplombenanker hinsichtlich konstruktiver Parameter sowie kurz- und langfristiger Tragfähigkeit getestet. Dabei wurden mit einer Ausnahme nur Ankerzugversuche mit jeweils konstanter Belastung durchgeführt. Die Ergebnisse der ersten Versuche während der Expedition 1980/81 konnten durch diese Expedition statistisch abgesichert werden.

Die Auswertung der in-situ gemessenen Kriechverformungen führte zu einer Bemessung, die auf der Grundlage der Modifikation bekannter Kriechgesetze die Möglichkeit bietet, unter Berücksichtigung von Verformung und Konstruktion die Tragfähigkeit in Abhängigkeit von der Lebensdauer zu bestimmen bzw. umgekehrt.

Phasendiagramm (Bild 2.1) ersichtlich, läuft Schmelzen unter Druck, auch als Regelation bekannt, innerhalb des Temperaturbereichs 0 ... -20 °C ab. Das Eis wird bei gleichbleibender Außentemperatur durch höheren Druck stärker verdichtet und geht somit vom weniger dichten Zustand Ih in den dichteren Zustand Wasser L über. Nach Glen 1975 /18/ ist der Regelationsprozeß ein Vorgang, bei dem die Eiskörner verformt werden, indem das Eis an Stellen hohen Drucks zwischen den Kristallen schmilzt und das Wasser entlang den Korngrenzen zu solchen Stellen hin fließt, an denen der Druck niedriger ist.

2.2 Die Dichte von Eis und Schnee und ihr Einfluß auf die Stoffeigenschaften

Die Dichte des Schelfeises ist an der Oberfläche die Dichte ρ_0 von frisch gefallenem Schnee. Mit zunehmender Tiefe steigt die Dichte bis zum Grenzwert von $\rho_E = 917 \text{ kg/m}^3$ von inkompressiblem Eis an. Definitionsgemäß findet der Übergang von Schnee zu Eis bei 800 bis 830 kg/m^3 statt /1/, die im Schnee enthaltenen Luftporen haben sich dann geschlossen, und das Eis ist so luftundurchlässig. Bild 2.2 zeigt die Dichteverteilung im Schelfeis an den Antarktis-Stationen Maudheim und Georg-von-Neumayer.

Im für Zugverankerungen maßgeblichen Bereich bis ca. -5 m nimmt die Dichte an der Georg-von-Neumayer-Station mit schichtenweise sehr starken Unterschieden (vgl. Bild 2.2) Werte von 380 bis 500 kg/m^3 an ($\rho_g = 460 \text{ kg/m}^3$) /58/.

Druck-, Zug- und Scherfestigkeit von Schnee steigen mit zunehmender Dichte an (Bild 2.3).

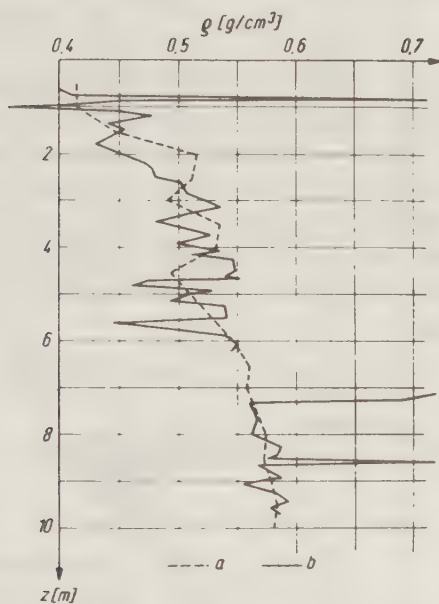
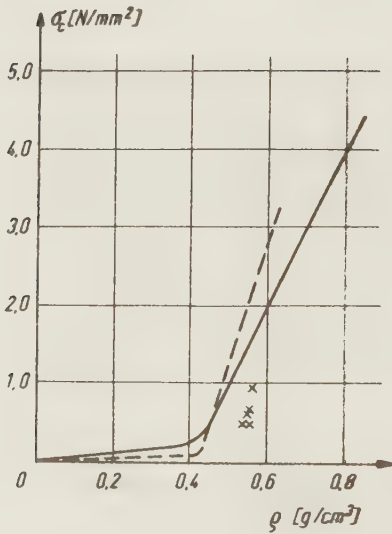
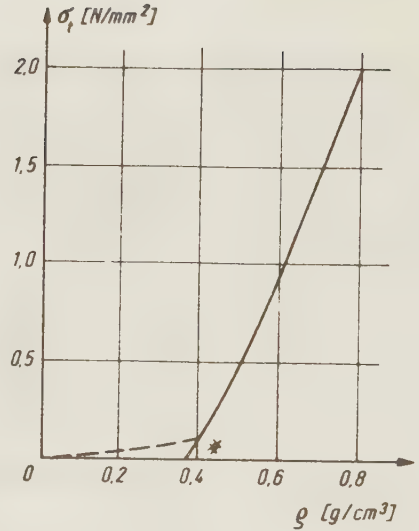


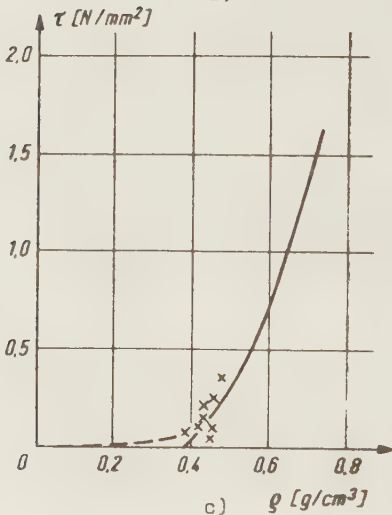
Bild 2.2: Dichteverteilung des Schelfeises über die Tiefe
a) nach Schytt 1958 /59/ für Maudheim
b) nach Jessberger, Dörr 1981 /29/ für Georg-von-Neumayer



a)



b)



c)

- x Versuchsergebnisse bei der Georg-von-Neumayer-Station ($T = -5^{\circ}\text{C}$) nach Jessberger, Dörr 1981 /29/
- Schnee in Site 2, Grönland ($T = -10^{\circ}\text{C}$) nach Butkovich 1954 /8/

Bild 2.3: Festigkeit von Polarschnee in Abhängigkeit von der Dichte

- a) einaxiale Druckfestigkeit σ_c
 b) Zugfestigkeit σ_t
 c) Scherfestigkeit τ

2.3 Die Temperatur des Schelfeises und ihr Einfluß auf die Stoffeigenschaften

Bild 2.4 zeigt den Verlauf der Temperatur des Schelfeises über die Tiefe an der Georg-von-Neumayer-Station am Beispiel des Monats Februar 1983. Die Temperaturen im Schelfeis sind ab einer Tiefe von ca. 1 m nur noch jahreszeitlichen Schwankungen unterworfen, deren Einwirkungen aber ebenfalls in ca. 5 m Tiefe abgeklungen sind, bei der die Jahresmitteltemperatur von ca. -17°C erreicht ist.

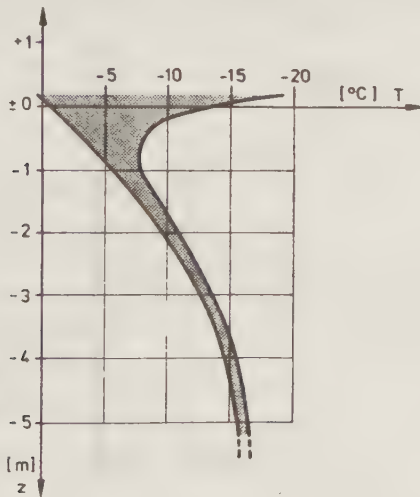
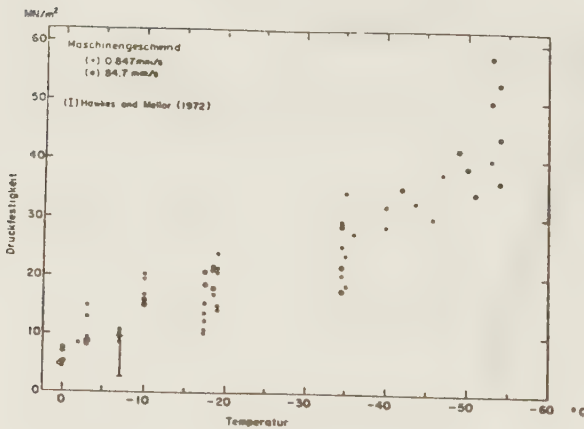


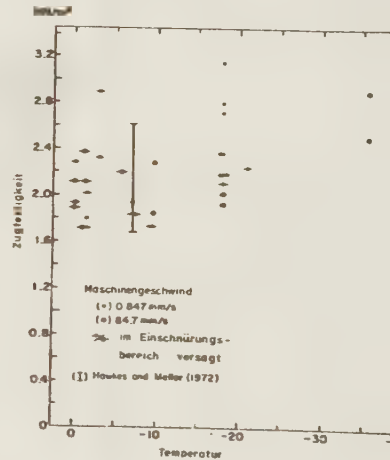
Bild 2.4: Bereich der Eistemperaturen in Abhängigkeit von der Tiefe (gemessen von der meteorologischen Station an der Georg-von-Neumayer-Station) im Monat Februar 1983

Einen umfangreichen Überblick über die Problematik des Temperatureinflusses auf die Festigkeit von Eis und Schnee gibt Haynes 1978 /25/, der sich bei seinen Versuchen jedoch auf

Schnee-Eis beschränkte. Dieses Eis wurde hergestellt, indem er gleichgroße Eiskörner, die aus Schnee ausgesiebt wurden, in eine Gußform brachte, sie mit 0°C kaltem Wasser sättigte und bei -23°C einfrohr. Das so erhaltene Eis war mit Luftporen durchsetzt, isotrop und polykristallin. Einaxiale Druck- und Zugversuche wurden bei Temperaturen von $-0,1$ bis -54°C mit Maschinengeschwindigkeiten von $0,847$ und $84,7$ mm/s durchgeführt. Bild 2.5 stellt die Druck- und Zugfestigkeit dieser Schnee-Eis-Proben in Abhängigkeit von der Temperatur dar. Die in diesen Bildern vermerkten Ergebnisse "Hawkes and Mellor" beziehen sich auf Versuche, die diese 1972 bei einer konstanten Temperatur von -7°C durchgeführt hatten /23/.



a)



b)

Bild 2.5: Festigkeit von Schnee-Eis in Abhängigkeit von der Temperatur nach Haynes 1978 /25/

a) Druckfestigkeit

b) Zugfestigkeit

2.4 Rheologische Eigenschaften von Eis und Schnee

Eis und Schnee verhalten sich visko-elastisch, sofern die auf-gebrachte Belastung relativ klein ist ($< 0,1 \text{ N/mm}^2$). Wird diese Belastung nur für kurze Zeit aufgebracht, reagieren Eis und Schnee rein elastisch. Bei längerer Belastungsdauer folgt der elastischen Verformung eine Kriechverformung. Die Verformungs-geschwindigkeit wird bei Belastungen $> 0,1 \text{ N/mm}^2$ proportional zur Belastung (sekundäres Kriechen), der Verformungsmechanismus wird somit visko-plastisch. Es wird durch die beschleunigte Verformung das tertiäre Kriechstadium erreicht, das den Beginn des Versagens kennzeichnet. Das Kriechverhalten im primären,

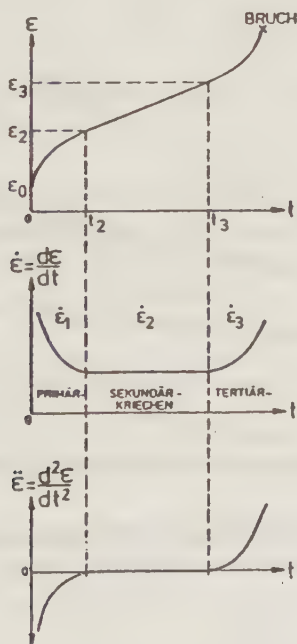


Bild 2.6: Idealisierte Kriechkurve von Eis und Schnee nach
Dörr 1983 /11/

sekundären und tertiären Bereich ist in Bild 2.6 idealisiert dargestellt.

Für längere Belastungszeiträume unter konstanter Belastung kann auf die Beschreibung des primären Kriechens verzichtet werden; man nehme eine Anfangsverformung ϵ_1 an und berechnet die Verformung bis zum Ende des sekundären Kriechens mit

$$\epsilon = \epsilon_1 + \dot{\epsilon}_2 t \quad (1)$$

Bild 2.7 stellt diese Vereinfachung der Kriechkurven für unterschiedliche Belastungen dar.

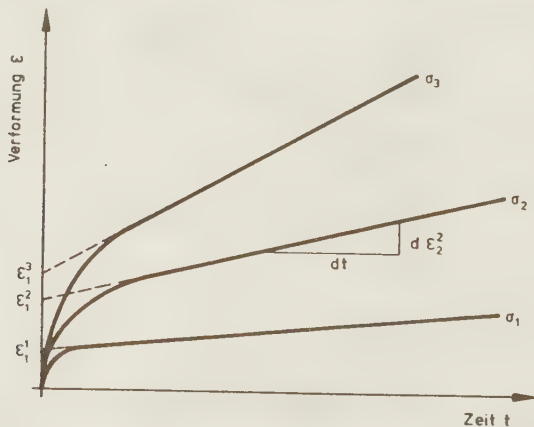


Bild 2.7: Vereinfachung der Kriechkurven nach Ladanyi 1972 /40/

Haefeli ermittelte so 1962 /22/ für eine einaxiale Druckbelastung von $0,1 \text{ N/mm}^2$ über 100 Tage eine konstante Verformungsgeschwindigkeit von $1,736 \times 10^{-10} \text{ s}^{-1}$ für Gletscheis (Bild 2.8).

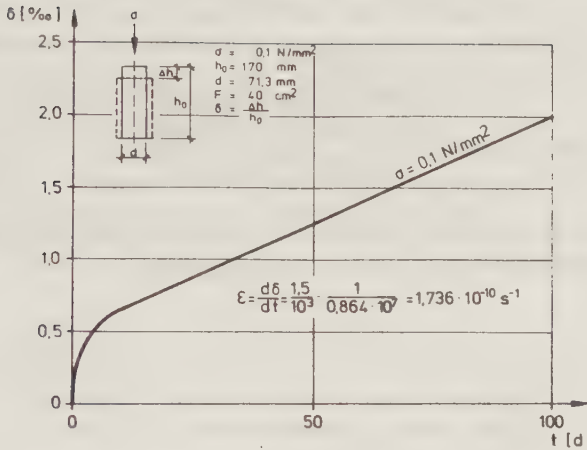


Bild 2.8: Zeit-Verformungs-Kurve für Gletschereis nach Haefeli 1962 /22/

Glen wies 1955 /15/ eine exponentielle Beziehung zwischen der Belastung σ und der sekundären Verformungsgeschwindigkeit $\dot{\epsilon}_2$ nach:

$$\dot{\epsilon}_2 = k \sigma^m \quad (2)$$

k, m - Konstante

Diese Beziehung erwies sich in der Folgezeit als ausgezeichnete Annäherung an das tatsächliche Verformungsverhalten /23,28,40/.

Unter Berücksichtigung des Temperatureinflusses erweiterte Glen Glg. (2) zu

$$\dot{\epsilon}_2 = k e^{\frac{Q}{RT}} \sigma^m \quad \text{für } T < 268 \text{ K} \quad (3)$$

k, m - Konstante

Q - Aktivierungsenergie von Eis

R - allgemeine Gaskonstante

T - absolute Temperatur

Erhöht man die Belastung stufenweise, erhält man die Verformung als Summation wie in Bild 2.9 dargestellt.

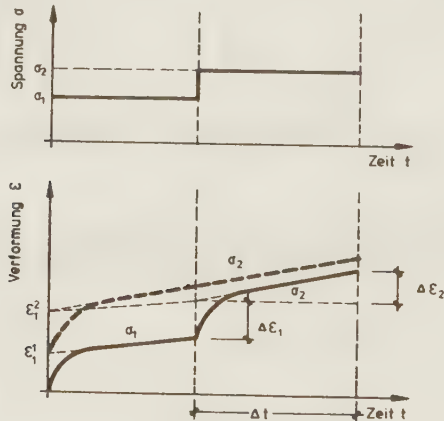


Bild 2.9: Reaktion auf Belastungserhöhung nach Ladanyi 1972 /40/

2.5 Elastische Eigenschaften von Eis und Schnee

Belastungen für Zugverankerungen können nicht nur langfristig und konstant sein, sondern sind in der Regel dynamisch oder kurzzeitig statisch. Um diesen Belastungszustand ermitteln und beschreiben zu können, benutzt man den E-Modul und die Querdehnungszahl ν .

Da es nicht möglich ist, den E-Modul von Schnee zu finden, indem man σ - ϵ -Kurven auswertet, wird er ermittelt, indem man Schneekörper in Schwingung versetzt und deren Eigenfrequenz elektronisch ermittelt. In-situ-Versuche benutzen seismische Methoden. Der E-Modul ist abhängig von Dichte und Temperatur. Er nimmt mit zunehmender Dichte und abnehmender Temperatur zu. Bild 2.10 zeigt den Zusammenhang von E-Modul und Dichte nach in-situ-Versuchen von Mellor 1964 /48/.

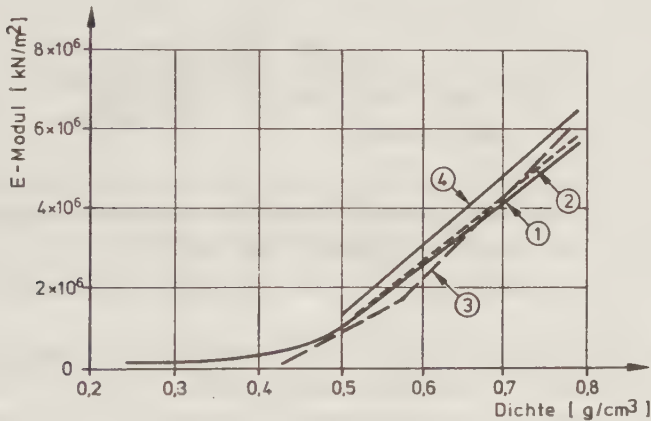


Bild 2.10: Dynamischer E-Modul für trockenen, gebundenen Schnee als Funktion der Dichte /48/

1,2 Grönland 3 Südpol 4 Ross-Schelfeis

Der dynamische E-Modul für Eis wird von Kaplar 1969 /34/ mit $8,3 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$ bei 0°C und mit $10,3 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$ bei -23°C angegeben.

Die Querdehnungszahl ν beschreibt das Verhältnis zwischen seitlichen und vertikalen Spannungen unter elastischen Bedingungen. Mellor /48/ ermittelte, daß ν in erster Linie von der Dichte abhängt (Bild 2.11).

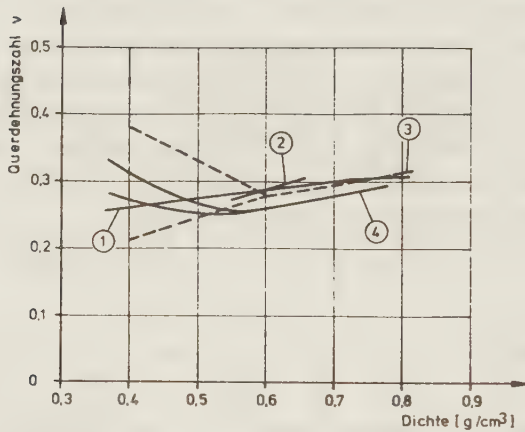


Bild 2.11: Querdehnungszahl v als Funktion der Dichte für trockenen Schnee, ermittelt in zerstörungsfreien Versuchen von Mellor 1964 /48/
1,2 Grönland 3 Ross-Schelfeis 4 West-Antarktis

Lange, Ahrens gaben 1983 /41/ die dynamische Zugfestigkeit von Eis bei einer Verformungsgeschwindigkeit von ca. 10^4 s^{-1} mit $17 (\pm 1) \text{ N/mm}^2$ an, während Hawkes, Mellor 1972 /23/ bei Verformungsgeschwindigkeiten von 10^{-2} bis 10^0 s^{-1} quasi-statische Zugfestigkeiten von etwa $1,6 \text{ N/mm}^2$ maßen (Bild 2.12).

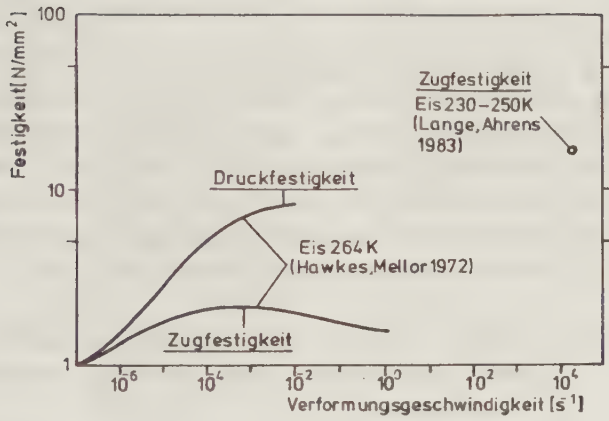


Bild 2.12: Druck- und Zugfestigkeit als Funktion der Verformungsgeschwindigkeit /23,41/

3. Verankerungsverfahren im Lockergestein und ihre Übertragung auf Eis und Schnee

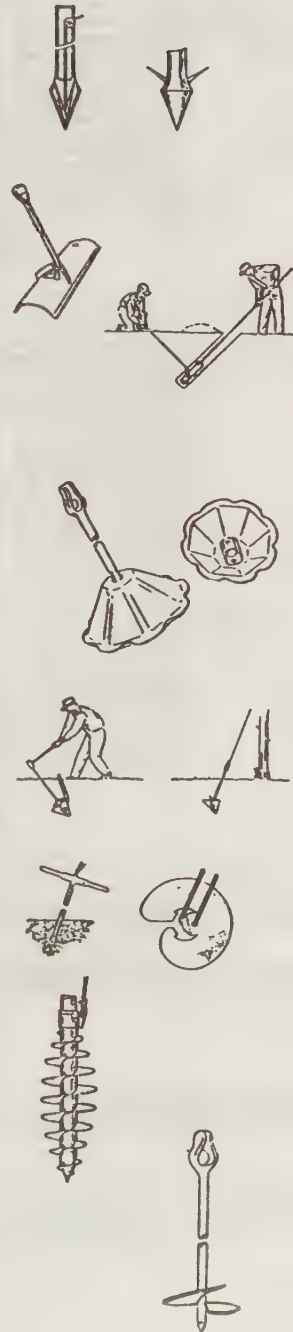
3.1 Überblick

Verankerungsverfahren, die in Schnee, Eis, gefrorenem Boden und Permafrost eingesetzt werden, gehen oft auf Verfahren zurück, die bereits in Lockergestein erprobt worden sind. Tabelle 3.1 beschreibt solche Ankertypen mit Angabe der Einbautechnologie der Wiederverwendbarkeit und der Einsatzgrenzen (nach McKelvy 1971 /45/, Hironaka 1974 /26/ und Kovacs 1967 /36/).

Tabelle 3.1: Bisher in Schnee, Eis, Permafrost sowie verschiedenen ungefrorenen Böden und Fels eingesetzte Ankertypen

Name	Beschreibung	Einbauverfahren	Ausbaubarkeit	Einschränkungen	Darstellung
Häringe, Pfähle oder Kombinationen	kleine Anker, bis zu 40 cm lang, bis zu 500 g schwer; hergestellt aus Holz, Stahl, Aluminium und Polypropylen	von Hand mit Hammer o. ä. eingetrieben	wieder auszubauen, aber schwierig in gefrorenen Böden	je nach Beschaffenheit der Pfähle evtl. Schwierigkeiten bei gefrorenen Böden	
Korkenzieheranker	am unteren Ende korkenzieherförmig verwundene gerade Stange mit Schlaufe am oberen Ende	von Hand mit Hebelwerkzeug durch die Schlaufe schnell einzudrehen	wieder auszuschauben	auf weiche Böden begrenzt	
Schneckenbohrer	gerade Stange mit konischem Bohrer am unteren und Öse am oberen Ende	von Hand mit Hebelwerkzeug durch die Öse schnell einzudrehen	wieder auszuschauben	Schwierigkeiten beim Einbau in Kies sowie feinsigen und gefrorenen Böden	
Schraubenanker mit ausspreizenden Zähnen	das untere Ende ist spitz, der Schaft hat ein Schraubengewinde, oben ist ein Loch senkrecht zur Längsachse, innen befindet sich ein Mechanismus, der die Zähne seitlich in den Boden treibt	von Hand mit Hebel- oder Motorwerkzeug einzuschrauben. Nach Einbau des Ankers wird innen eine Schraube angezogen, um die Zähne auszuspreizen	wieder auszuschauben	es liegen keine Testergebnisse vor	
Schraubexpansionsanker	ähnlich einer Schiffschraube, Mittelstab mit exzentrisch angebrachten Flügeln, die nach Einbau des Ankers in den Boden getrieben werden	von Hand mit Hebel- oder Motorwerkzeug in den Boden einzuschrauben. Wenn die erforderliche Tiefe erreicht ist, öffnet ein Drehen des Ankers gegen den Uhrzeigersinn den Anker	nicht wieder auszubauen	nicht einsetzbar in sehr harten Böden wie grobkörnigen, gefrorenen Böden	

zahl us- enden	runder Stab mit koni- scher Spitze (ähnlich einem Pfeil), Innen- befinden sich Zähne, die ausspreizen, wenn das im Inneren des Stabes verlaufende Zugseil angezogen wird.	von Hand mit Vor- schlag- oder Motor- hammer in den Boden zu treiben. Durch Anziehen des Zugse- iles werden die Zähne nach außen gedrückt.	nicht wieder auszubauen	-
's ender	zusammengesetzt aus 2 Teilen: einem offen- en Halbzylinder und einer Stange, die in der Mitte des Halb- zylinders befestigt ist.	Es wird ein Loch bis zur gewünschten Tiefe gegraben, der Halbzyl- inder wird mit einer Hakenstange in das Loch geschoben, so daß die Längsachse des Zylinders paral- lel zu der des Lochs verläuft. Die Anker- stange wird dann so in den Boden ge- trieben, daß sie senkrecht auf die Zy- linderplatte trifft, die mit Hilfe der Ha- kenstange an der An- kerstange befestigt wird. Das Loch wird lagenweise verfüllt und verdichtet. Der Anker sollte nachge- spannt werden.	nicht wieder auszubauen	in felsigen oder gefrorenen Böden können Schwierig- keiten beim Boh- ren des Loches oder beim Ein- treiben der An- kerstange auf- treten.
's	gerade Stange mit einer Konusplatte am unteren und einer Üse am oberen Ende	Es wird ein Loch ge- bohrt mit einem et- was größeren Durch- messer als der des Konus, der Anker gesetzt und das Loch lagenweise verfüllt und ver- dichtet.	Die Anker- platte kann nicht wieder abgebaut wer- den, die Stange aber kann abge- schraubt wer- den.	beschränkt auf Böden, in denen man das Loch bohren kann.
sal- er- ni-	dreieckige Schaufel- fläche, an der ein Zugseil befestigt ist	Der Anker wird mit einem Vorschlagham- mer o.ä. über eine abnehmbare Verlänge- rungsstange einge- trieben und anschlie- ßend nachgespannt.	praktisch nicht wieder auszubauen	evtl. bereiten gefrorene Böden Schwierigkeiten beim Einschlagen des Ankers
ben-	Schraubenteller mit Zugseilen	von Hand oder mit Motorkraft in den Boden zu schrauben. Während des Ein- schraubens sind die Zugseile innerhalb des Einbauschafes geschützt, um Be- schädigungen zu ver- hindern. Dieser Ein- bauschaf wird nach dem Einbau entfernt.	praktisch nicht wieder auszubauen	Schwierigkeiten bei felsigen sowie grobkörnigen gefrorenen und ungefrorenen Böden
ger- ben-	Stange mit großflä- chigem Schraubenge- winde, dessen Durch- messer nach oben und unten kleiner wird	mittels einer ab- nehmbaren Stange von Hand oder mit Motorkraft in den Boden zu schrauben	wieder aus- zubauen	begrenzt durch die manuelle oder maschi- nelle Kraft
ben-	gerade Stange mit einem Schraubenteller am unteren und einer Üse am oberen Ende	von Hand oder mit Motorkraft in den Boden zu schrauben	wieder aus- zubauen	bei felsigen oder grobkörnigen ge- frorenen Böden könnte die Anker- stange verbiegen oder der Anker könnte gar nicht eingeschraubt werden können



Chance's
8teilliger
Expansions-
anker

gerade Stange mit mittig angebrachter, runder Ankerplatte und quadratischer, etwas größerer Metallplatte, die in der Mitte ein Loch hat, durch das der Anker verläuft. Die Metallplatte besteht aus 8 "Blättern", die beim Einführen des Ankers ins Loch gefaltet sind und danach aus- spreizen.

Es wird ein Loch bis zur erforderlichen Tiefe gebohrt mit einem etwas größeren Durchmesser als der des zusammengefalteten Ankers. Wenn der Anker an der richtigen Stelle ist, wird die Ankerstange gedreht, wodurch die runde Ankerplatte hochgezogen wird und so die Blätter entfaltet. Das Loch wird dann verfüllt und verdichtet.

nicht wieder auszubauen

Der Anker kann nur in Böden gesetzt werden, in denen das Loch gebohrt werden und der Anker sich öffnen kann.



3teilliger,
immer sit-
zender
Expansions-
anker

mittig angeordnete Stange mit einer Ankerplatte, die aus 3 einzelnen Platten besteht, die mit Klammern an einem Mittelstück befestigt sind, das sich auf der Stange bewegen kann. Beim Einbau des Ankers sind die 3 Einzelplatten so übereinander angeordnet, daß sie eine geschlossene Platte bilden. Gleitet das Mittelstück abwärts, werden die Einzelplatten seitwärts in den Boden getrieben.

Es wird ein Loch bis zur gewünschten Tiefe gebohrt mit einem etwas größeren Durchmesser als der des geschlossenen Ankers. Der Anker wird gesetzt und die Ankerstange gedreht, um die Bodenplatten in den Boden zu treiben. Das Loch wird dann verfüllt und lagenweise verdichtet.

nicht wieder auszubauen

Der Anker kann nur in Böden gesetzt werden, in denen das Loch gebohrt werden und der Anker sich öffnen kann.



Eingegrabe-
ner Klap-
penanker

mittig angeordnete Stange mit einer Öse am oberen und 2 Ankerklappen am unteren Ende der Stange, die beim Einsetzen des Ankers nach oben geklappt sind und nach Einbau seitlich waagerecht abgeklappt werden.

Mit Motorbohrer wird das Loch ausgehoben, das oben einen etwas größeren Durchmesser hat als der geschlossene Anker. Wenn der Anker in der richtigen Position sitzt, wird das Loch wieder verfüllt. Der Anker wird vorgespannt, um die Klappen zu öffnen und so den Anker lastaufnahmefähig zu machen.

nicht wieder auszubauen

eingeschränkt auf Böden, in denen man das Ankerloch bohren kann; auch begrenzt durch die Tragfähigkeit der Klappen



Vierfach-
Expansions-
anker

mittiger Vierkantstab mit Öse am oberen und 4 Ankerhaken am unteren Ende, die mit Klammern an einem Mittelstück befestigt sind, das sich auf dem Stab bewegen kann

Es wird von Hand oder mit Motorkraft ein Loch gebohrt mit einem etwas größeren Durchmesser als der des zusammengeklappten Ankers. Der Anker wird eingesetzt und das Loch verfüllt. Dann wird der Anker vorbelastet, um die Ankerhaken zu öffnen.

nicht wieder auszubauen

eingeschränkt auf Böden, in denen man das Ankerloch bohren kann



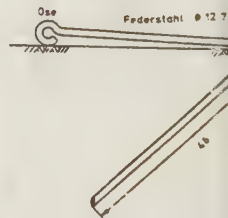
kleiner
Hakenanker

V-förmig gebogener Federstahl mit einer Öse am oberen Ende

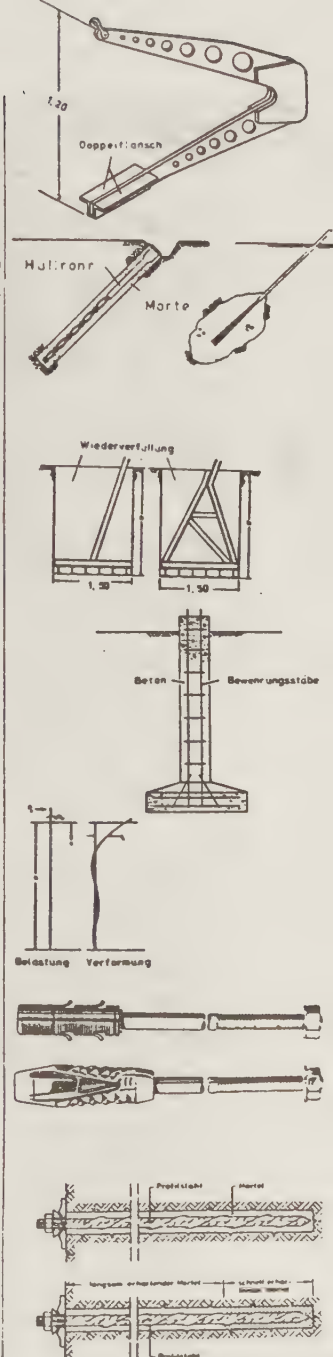
mit Hammer o.ä. so in den Boden getrieben, daß der obere Schenkel parallel zur Geländeoberfläche verläuft

wieder aus-
zubauen

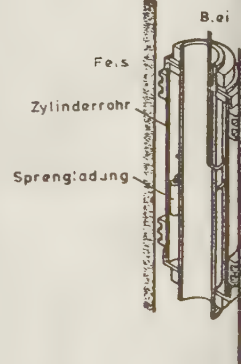
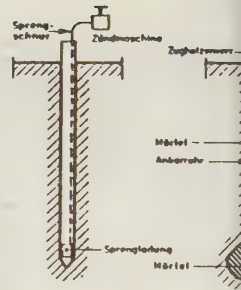
große Felsbrocken im Boden können Schwierigkeiten bereiten



V-förmiger Stahl mit einer Öse am oberen und 2 Flanschen am unteren Schenkel	Es wird mit einem Motorbohrer ein Loch ϕ 15 cm in einem Winkel zur Geländeoberfläche gebohrt und der Ankerschenkel eingesetzt.	wieder auszubauen	begrenzt durch Bodenparameter und Tragfähigkeit des Ankers
Hohlrohr und Spannglieder	Es wird in einem Winkel zur Geländeoberfläche ein Loch bis zur erforderlichen Tiefe gebohrt und evtl. unten glockenförmig aufgeweitet. Der Anker wird gesetzt, verpreßt und nach Erhärtung des Mörtels gespannt.	nicht wieder auszubauen	Ankertragfähigkeit ist begrenzt durch Ankergröße, Spannglied- und Mörtelfestigkeit sowie Bodenparameter
Grundplatte aus gekreuzten Stahlträgern mit einem Stahlfachwerk	Es wird eine Grube ausgeschachtet, die Grundplatte wird mit dem Tachwerk auf die Sohle gesetzt und das Loch wird mit Erde und Steinen wieder verfüllt.	nicht wieder auszubauen	beschränkt auf Böden, in denen die Grube gegraben werden kann. Sehr arbeitsintensiv
unterirdische Betonstütze mit Einzelfundament	Es wird ein Loch mit dem erforderlichen Durchmesser bis zur erforderlichen Tiefe gebohrt, das Loch wird unten glockenförmig aufgeweitet, die Bewehrung wird eingebracht und der Beton wird bis zur Oberfläche eingefüllt.	nicht wieder auszubauen	-
Pfähle wie in der Bauindustrie verwendet	mit Ramme einzutreiben	nicht wieder auszubauen	-
Übliche, in der Bauindustrie verwendete, in großer Anzahl und Vielfalt zur Verfügung stehende Felsanker	Es wird ein Loch gebohrt, der Anker gesetzt und durch Anziehen des Zugbolzens verspannt.	möglich, aber i.A. nicht praktiziert	begrenzt durch Zugfestigkeit der Ankerstange, Bodenparameter und Einbindetiefe
In der Bauindustrie übliche Felsanker	Es wird ein Loch gebohrt, der Anker gesetzt und unter Druck verpreßt.	nicht wieder auszubauen	begrenzt durch Zugfestigkeit der Ankerstange, Bodenparameter und Einbindetiefe. Keine sofortige Belastbarkeit wegen Erhärtungsfrist, die bei niedrigen Temperaturen länger wird.



Anker mit gesprengter Aufweitung	hohle Ankerstange mit Sprengladung am unteren Ende	Es wird ein Loch ϕ 5 cm gebohrt, der Anker wird eingetrieben und eine Sprengladung wird im Anker zum Bohrloch-tiefsten herunterge-lassen und zur Explo-sion gebracht. Dann wird Mörtel durch den Anker in die ent-standene Aufweitung bis 30 cm unter Ge-ländeoberkante ein-gefüllt und ein Zug-bolzen in den fri-schen, schnellhär-tenden Mörtel einge-setzt.	nicht wieder auszubauen	beschränkt auf Böden, in denen die Aufweitung gesprengt werden kann
Spreng-expan-sions-anker	Zylinderrohr, das über einem hohlen Ankerstab sitzt mit einer Sprengladung dazwi-schen	Es wird ein Loch in den Fels gebohrt, Anker und Zugstange werden eingesetzt, die Sprengladung wird zur Explosion gebracht, wodurch sich das Zylinder-rohr aufweitet.	nicht wieder auszubauen	-



Über die Weiterentwicklung dieser Verankerungen im Lockergestein gibt eine Aufstellung von Patenten für Geräte und Methoden zum Ankern in Eis und gefrorenen Böden Aufschluß (s. Tabelle 3.2).

Tabelle 3.2: Patente für Geräte und Methoden zum Ankern in Eis und gefrorenem Boden nach Hironaka 1974 /26/

Patent-Titel	Patent-Nr.	Patent-Datum	Verankerungs-medium	Beschreibung
Eis- oder Frostboden-anker	3,304,671	21.02.1967	Eis- oder Frostboden	Dieser Anker besteht aus einem Zylinder, in dem sich (v.o.n.u.) eine gespannte Feder befindet, eine Kabeltrommel, eine flache Platte und eine entzündbare Substanz (wie Thermit). Beim Setzen des Ankers wird die Montagegruppe in ein Loch eingebracht, und das entzündbare Material kann sich entzünden. Sobald es verbrannt ist, löst sich die gespannte Feder und treibt die Einzelteile abwärts in das Loch hinein. Die Hitze, die durch das Verbrennen entsteht, bewirkt, daß Eis und gefrorener Boden in der Umgebung des unteren Teils der Anker schmelzen. Durch die Schwerkraft senken sich die Kabel in diesen aufgetauten Bereich hinein. Nach dem Wiedergefrieren des getauten Bereiches, der jetzt die Kabel umgibt, ist der Anker zum Gebrauch bereit, und zwar über eine Öse, die am Kopf des Zylinders befestigt ist.
Eisanker	3,157,256	25.08.1961	Eis- oder Frostboden	Dieser Anker besteht aus drei Teilen: Der erste ist eine stabile Metallplatte mit abwärts gerichteten, abgerundeten Rändern, so daß sie das Aussehen einer umgekehrten Pfanne mit einwärts gebogenen Kanten hat. Der zweite Teil ist eine Metallplatte, die ähnlich geformt ist, jedoch in Dicke und Radius ungefähr halb so groß wie der erste Teil. Diese zweite Platte ist konzentrisch an der ersten Platte befestigt. Am dritten Teil wird die Last befestigt; er besteht aus einer Öse an einer spinnenförmigen Klammer, die fest mit den o.g. Platten verbunden ist. Der Anker wird wie folgt eingebaut: er wird von einer ebenen Oberfläche aus gesetzt, und die umgekehrten Pfannen werden durch Einblößen in den Platten oder durch Untertauchen in einem flachen Wasserbecken mit Wasser gefüllt. In beiden Fällen wird, wenn das Wasser wieder gefriert, ein fester Verbund zwischen Anker und gefrorenen Fläche geschaffen.
Verfahren und Geräte zur Verbesserung der Tragfähigkeit von Pfählen in Permafrost	3,706,204	19.12.1972	Permafrostboden	Diese Erfindung besteht aus einem Pfahl mit zylindrischen oder segmentzylindrischen Ringen, die sich strahlenförmig nach außen hin über die Pfahloberfläche hinaus erstrecken und sich am Fuß des Pfahles befinden, der in Permafrost tiefer als der saisonale Taubereich eingebunden wird. Der Rest des Pfahles oberhalb des in Permafrost gebetteten Teiles hat eine glatte Außenfläche. Der Pfahl wird eingebaut, indem man ihn in ein vorgebohrtes Loch einsetzt und das Bohrloch wieder mit Material auffüllt, das schließlich wieder gefriert und zu einem Teil des das Loch umgebenden Permafrostbodens wird. Zweck und Ziel der Erfindung ist es, die Tragfähigkeit des Pfahles zu erhöhen, aber sie wird auch die Verankerungsfähigkeit solcher Pfähle verbessern.
Arktis-pfählung, beständig gegen Frostbruch	3,703,812	28.11.1972	Saisonal gefrorene Tundra	Wenn der Tundraboden gefriert, so dehnt er sich aus, und das verursacht Druck- und Anhebewirkung auf einen Pfahl. Die Erfindung benutzt diesen Druckeffekt, um die Hebewirkung auf den Pfahl zu verringern. Die Erfindung besteht aus einem Kegelstumpf mit einem Grundflächendurchmesser, der mindestens dreimal so groß ist wie der Pfahldurchmesser, in einem Neigungswinkel im Bereich von 3 - 30°. Die Erfindung wird an einem Pfahl angebracht, der seinen Fuß möglichst auf oder in Permafrost und die Spitze an der Geländeoberfläche hat. Die Erfindung ist dafür gedacht, die Leistung der Pfähle hinsichtlich ihrer Tragfähigkeit zu verbessern, aber sie wird auch positive Wirkung zeigen, wenn die Pfähle als Anker benutzt werden.

3.2 Verankerungen mit eingegrabenen Ankern

3.2.1 Verankerungsprinzip

Das in Eis und Schnee bislang am häufigsten eingesetzte Verankerungsverfahren ist die Verankerung mittels eingegrabener Gegenstände. Das Herstellungsprinzip besteht darin, daß ein Loch in den Boden gegraben oder gebohrt wird, ein Zugglied mit einem Verankerungskörper in das Loch eingebracht und das Loch dann wieder verfüllt wird. Nimmt man als Verankerungskörper Fässer, Holzbohlen oder Bretter, wird ein solcher Anker "Toter-Mann"- bzw. "Dead-Man"-Anker genannt /35/. Als Verankerungskörper können ansonsten auch Ankerplatten verwendet werden. Eine Tragfähigkeit des Ankers wird dadurch erreicht, daß die Zugbelastung entweder durch in seinem Gefüge ungestörten Schnee oder durch wiederverfüllten Schnee aufgenommen wird, der über eine ausreichende Scherfestigkeit verfügt.

3.2.2 Anwendung von eingegrabenen Ankern in Grönland

Kovacs führte in der Zeit zwischen 1962 und 1964 in Camp Century in Grönland Versuche mit eingegrabenen Ankern durch /36/. In 2 Langzeitversuchen wurden die Anker (G17 und G19) sehr lange belastet, so daß es nicht zum Versagen der Anker kam, sondern nur zu Kriechverformungen. Bild 3.1 zeigt die Kriechkurve des Ankers G19.

Insgesamt wurden 10 Anker eingebaut und belastet. Tabelle 3.3 zeigt die Versuchsparameter. Die Ankerlöcher wurden gebohrt, und der Schnee wurde rückverfüllt und eingestampft. Die Schneetemperaturen lagen zwischen $-19,6$ und $-26,5$ °C. Bild 3.2 zeigt die Belastungsanordnung für die Ausziehversuche, Bild 3.3 die Kriechkurve des Ankers Nr. 5.

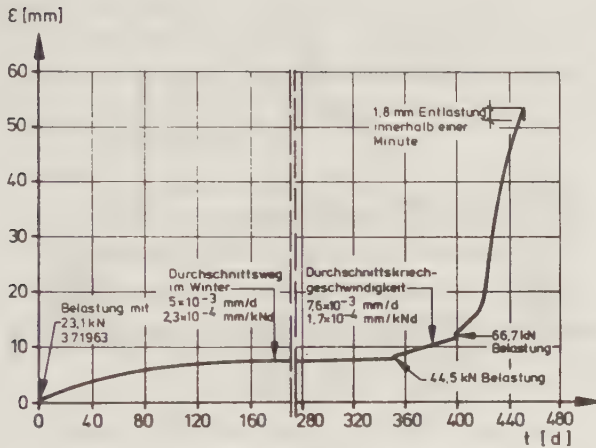


Bild 3.1: Kriechkurve des Dauerankers G19 /36/

Tabelle 3.3: Versuchsparameter der Versuche von Kovacs /36/

Anker Nr.	Ankerplatten- durchmesser cm	Ankerplatten- dicke mm	Einbinde- tiefe m	Bohrloch- durchmesser cm	Einbau	Belastung	Typ des Auszieh- Versuchs
1	15,2	12,7	2,44	36,9	5.7.62	20.7.62	schnell
2	25,4	12,7	2,44	36,9	5.7.62	20.7.62	schnell
3	35,6	12,7	2,44	36,9	5.7.62	20.7.62	schnell
5	30,5	25,4	0,61	36,9	6.7.62	14.7.62	schnell
6	30,5	25,4	1,22	36,9	6.7.62	14.-18.7.62	schnell
7	30,5	25,4	1,83	36,9	6.7.62	21.7.62	schnell
8	30,5	25,4	2,44	36,9	6.7.62	21.7.62	schnell
9	30,5	25,4	3,05	36,9	6.7.62	23.7.62	schnell
G17	30,5	25,4	2,44	36,9	25.8.62	Sommer 63/64	Dauer
G19	30,5	25,4	2,44	36,9	27.8.62	Juni 63 - Sept. 64	Dauer

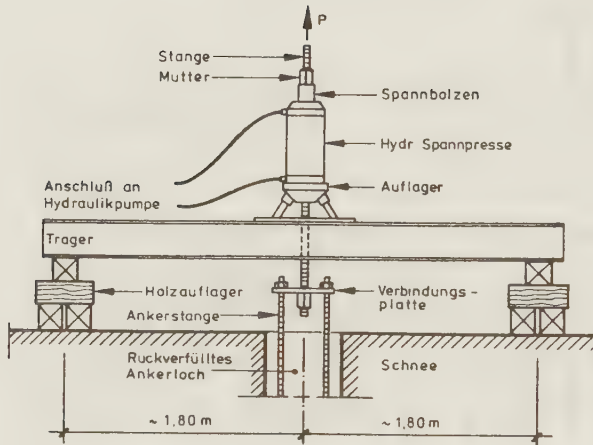


Bild 3.2: Versuchsapparatur für die Ausziehversuche /36/

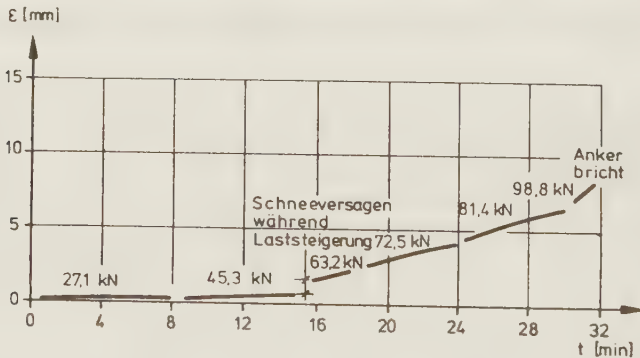


Bild 3.3: Kriechkurve des Ankers Nr. 5 /36/

Grundsätzlich wurden die Anker bis zum plötzlichen Versagen oder bis zum Durchbrechen der Oberfläche belastet. Wenn der Schnee trotz Druckabfalls der Presse durch große Kriechge-

schwindigkeiten nicht aufbrach, wurde der Anker nochmals von unten angefangen stufenweise belastet, bis er schließlich die Schneeoberfläche durchbrach oder - bei größeren Einbindetiefen ($l_A/d > 6$) - ohne sichtbare Zeichen an der Oberfläche versagte. Einige Anker wurden so bis zu viermal belastet (Bild 3.4).

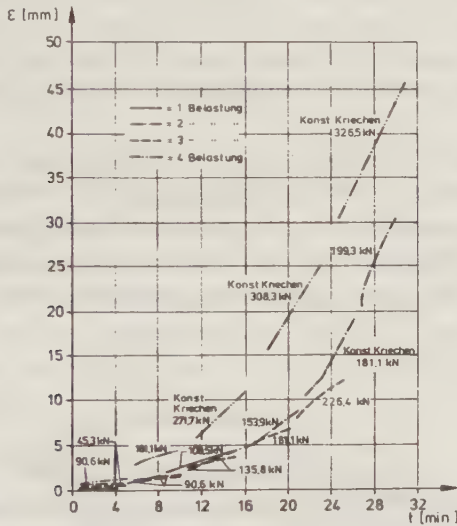


Bild 3.4: Kriechkurven des Ankers Nr. 6 (4 Belastungsdurchgänge) /36/

Hironaka faßte daraufhin 1974 /26/ die wichtigsten Erkenntnisse aus den von Kovacs durchgeführten Versuchen in drei Punkten zusammen:

- Anker mit einem Ankerplattendurchmesser von $d = 25,4$ cm und einer Einbindetiefe $l_A = 1,83$ m können längere Zeit mit 134 kN belastet werden, ohne daß sie schlagartig versagen; Kriechverformungen müssen allerdings in nicht geringem Maße in Kauf genommen werden,
- es scheint, daß sich das Verhalten des polaren Schnees bei

$l_A/d = 6$ ändert,

- bei gleich tiefen, gleich belasteten Ankern mit unterschiedlichen Plattendurchmessern rufen die Anker mit den kleineren Platten die größeren Verformungen pro Zeiteinheit hervor, aber bei gleicher Belastung pro Fläche insgesamt geringere Verformungen.

3.2.3 Anwendung eines "vorgespannten" Ankers in der Antarktis

Ein neues Verankerungssystem für Zugkräfte von 10 bis 30 kN, das speziell für eine Mastverankerung an der Georg-von-Neumayer-Station entwickelt wurde, stellten Jessberger, Bässler 1984 vor /31/. Dieser Anker besteht aus einem Zugglied mit einem Propfen aus verdichtetem und vorbelastetem Schnee (Bild 3.5).

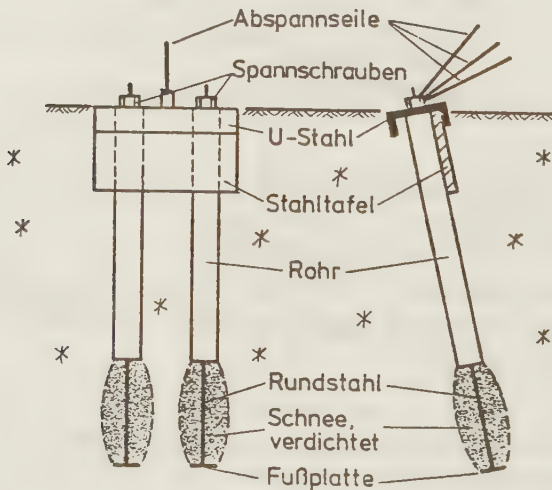
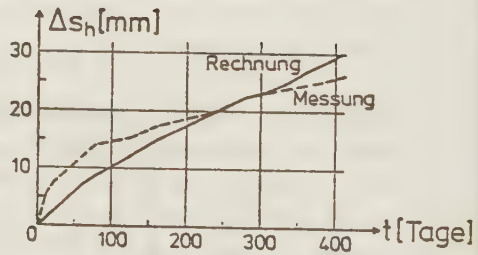
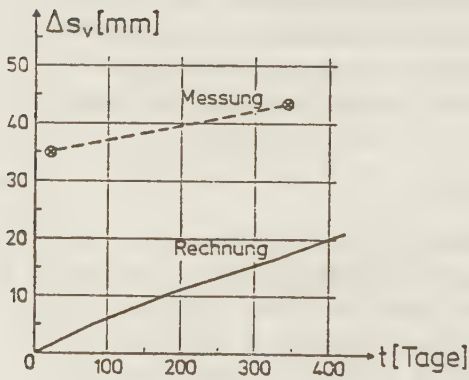
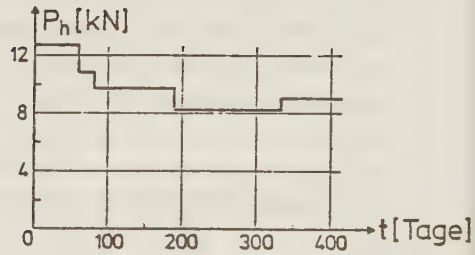
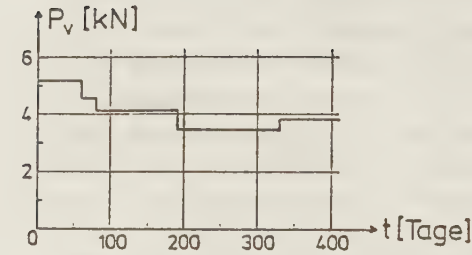


Bild 3.5: Prinzipskizze des Verankerungssystems von Jessberger, Bässler /31/

Zur Herstellung wurden mit dem SIPRE-Eisbohrer 4 m tiefe, geneigte Löcher von ca. 10 cm Durchmesser gebohrt. Eine Zugstange mit Ankerplatte wurde in das Bohrloch eingebracht, das dann teilweise mit Schnee aufgefüllt wurde. Anschließend verdichtete man den Schnee und steckte ein Rohr $\varnothing$ 10 cm über die Zugstange. Nachdem die Stahltafel und der U-Stahl montiert waren, wurde der Schnee durch Anziehen der Spannschrauben auf der Zugstange zusätzlich vorgespannt. Der Schnee vor der Stahltafel wurde ebenfalls verdichtet.

Die Belastung des Ankers erfolgte nicht in Achsenrichtung, sondern mit 50 - 80° Neigung zur Achse, so daß sich eine nahezu vertikale Zugkraft beim Anker und ein horizontaler Druck über die Stahltafel auf den Schnee einstellten. Die Zugkraft wurde durch den Schneepropfen auf das umgebende Schelfeis übertragen. Je nach aufzunehmender Zugkraft bestand ein Anker aus 1, 2 oder mehr Zuggliedern. Kraft und Verformung wurden in situ gemessen.

Jessberger, Bässler boten auch ein Bemessungsverfahren an, das durch die gemessenen Verformungen bestätigt wurde. Es stellte sich in vertikaler Richtung nach einer sekundären Verformung von 35 mm eine über 300 Tage konstante sekundäre Verformungsgeschwindigkeit von ca. $3 \cdot 10^{-7}$ mm/s bei einer Vorspannkraft von ca. 3,5 bis 5 kN ein, die eine langfristige Tragfähigkeit sichert. Auch die horizontale Verformung ging nach anfänglicher stärkerer Verformung auf ca. $3 \cdot 10^{-7}$ mm/s bei einer Vorspannkraft von 8 bis 10 kN zurück (Bild 3.6).



a)

b)

Bild 3.6: a) Vertikale und b) horizontale Vorspannkraften und Verformungen an einem Verankerungspunkt des 45-m-Mastes an der Georg-von-Neumayer-Station ./31/

3.3 Schraubenanker

Das Charakteristische an diesem Verankerungsverfahren ist in erster Linie sein Einbaumechanismus. Schraubenanker werden meist von Hand oder mit maschineller Unterstützung bis zur gewünschten Tiefe in den Boden gedreht und können dann belastet werden. McKelvy /45/ beschreibt solche Verankerungsverfahren aus dem Lockergestein (s. Tabelle 3.1). Schraubenanker können in der Regel schnell von Hand eingebaut werden und sind häufig wiederzugewinnen. Im Lockergestein ist ihre Anwendung dann begrenzt, wenn die Böden felsig oder mit großen Felsbrocken durchsetzt sind.

Bild 3.7 zeigt einen Schraubenanker und seinen Einbau.



Bild 3.7: Schraubenanker /45/

In Eis und Schnee werden Schraubenanker häufig eingesetzt. Die Verankerungskraft wird allein durch die schraubenförmig verwundene Ankerplatte gewährleistet. Ein Einsatz in Eis und Schnee führt hinsichtlich Tragfähigkeit und Verformung zu befriedigenden Ergebnissen /45/.

3.4 Verpreßanker

3.4.1 Verankerungsprinzip

Verpreßanker finden heute in Lockergestein, aber auch in Fels vielfach Anwendung, so als rückwärtige Verankerung von Baugrubenwänden oder als Sicherungsmaßnahme im Tunnelbau. Die DIN 4125 regelt Bemessung, Ausführung und Prüfung von Verpreßankern für vorübergehende Zwecke und für dauernde Verankerungen im Lockergestein. Verpreßanker sind Erdanker, bei denen durch Einpressen von Zementschlämme oder -mörtel um den hinteren Teil eines in den Boden eingebrachten Stahlzuggliedes ein Verpreßkörper hergestellt wird, der über Stahlzugglied und Ankerkopf mit dem zu verankernden Bauteil kraftschlüssig verbunden wird. Eine vom Verpreßanker aufzunehmende Kraft wird nicht - wie bei Ankerpfählen ohne Fuß - über die ganze Länge, sondern nur im Bereich des Verpreßkörpers in den Boden eingeleitet.

Durch die Art der Krafteinleitung eines Verpreßankers in den Boden, die nur im hinteren Teil des Ankers erfolgt, werden eine verankerte Zone und eine Verankerungszone geschaffen. Diese Verankerungszone muß so die gesamte Kraftübertragung übernehmen. Bild 3.8 zeigt einen Verpreßanker mit verankerter Zone und Verankerungszone. Für senkrechte Verankerungen im Lockergestein bedeutet das, daß man den Verankerungskörper so tief wie möglich in die unteren Schichten verlegt, um die Verankerungszone in einer Schicht zu haben, die stärker verdichtet ist als die darüberliegenden und deren Rückhaltekraft gegen Herausziehen noch durch das Eigengewicht der Überlagernden Schichten erhöht wird.

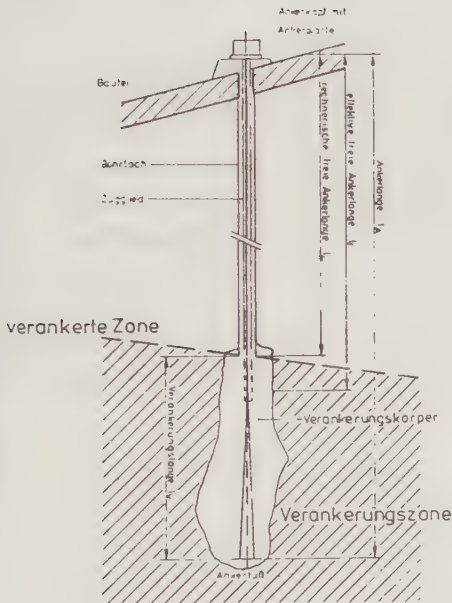


Bild 3.8: Verpreßanker mit verankerter Zone und Verankerungszone

3.4.2 Anwendung des Verpreßbankers im Lockergestein

Als Beispiel für eine senkrechte Verankerung mit Hilfe eines Verpreßankers im Lockergestein soll ein von Müller 1966 /51/ beschriebener Langzeitversuch mit einer BBRV-Lockergesteinsverankerung dienen. Dieses Verankerungsverfahren arbeitet mit vorgespannten Zugankern, die erst durch die Vorspannung lastaufnahmefähig werden. Bild 3.9 zeigt das Zeit-Kraft-Diagramm und das Zeit-Weg-Diagramm dieses Langzeitversuches.

Hierbei sollte geklärt werden, wieviel Prozent der aufge-

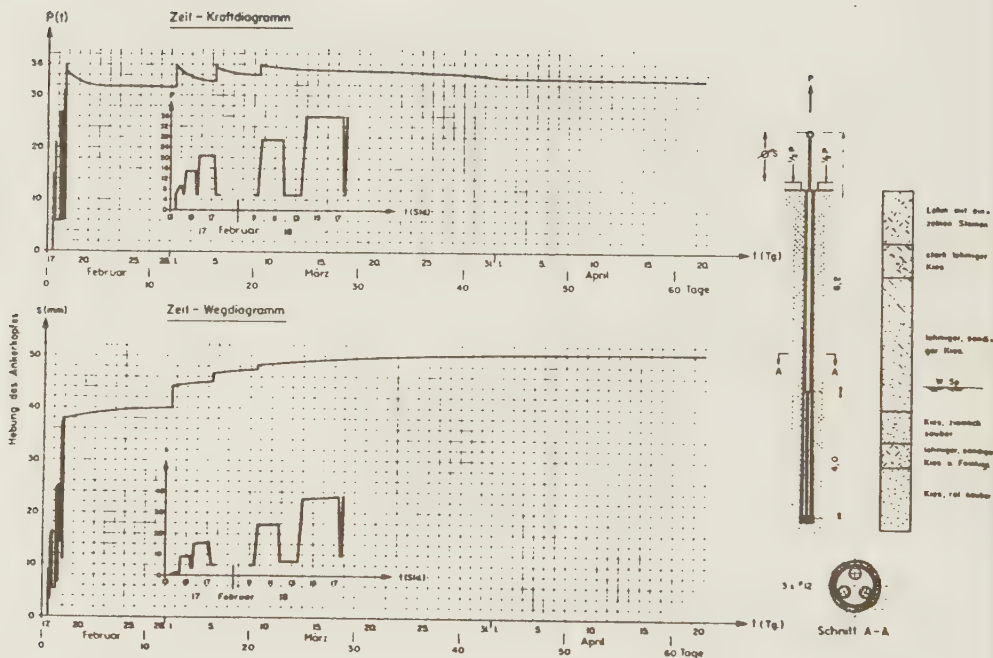


Bild 3.9: Langzeitversuch mit BBRV-Lockergesteinsverankerung /51/

brachten Vorspannkraft nach einer bestimmten Zeit noch zur Verfügung stehen. Die Diagramme des Bildes 3.9 zeigen, daß das anfänglich starke Kriechen des Ankers Spannungsabfälle erzeugte, die immer wieder durch Nachspannen korrigiert werden mußten, daß jedoch nach einiger Zeit das Kriechen ganz verschwindet, so daß sich nach ca. 60 Tagen Belastungsdauer eine Stabilisierung der Vorspannkraft ergibt, die 80 % des anfänglich aufgebrauchten Betrages ausmacht. Ein weiteres Kriechen des Ankers unter konstanter Last wurde nicht mehr gemessen.

3.4.3 Übertragung des Prinzips eines Verpreßankers auf Eis und Schnee

Modifiziert man in Lockergestein oder Fels angewendete Verpreßanker, ist der Einsatz eines Verpreßankers in Eis und Schnee möglich (s. Tabelle 3.1). Neben den beiden hauptsächlich benutzten Ankergruppen Toter-Mann- und Schraubenanker ist daher der Verpreßanker als drittes mögliches Verankerungsprinzip in Eis und Schnee anzusehen. Anzustreben ist dabei für einen erfolgreichen Einsatz in der Antarktis, den bei Verpreßankern in der Regel verwendeten Mörtel durch den Bedingungen der Antarktis angepaßte Materialien zu ersetzen, z.B. einen Verankerungskörper aus Eis herzustellen.

3.5 Bewertung und Aussagen zum derzeitigen Stand der Kenntnisse

Um Verankerungen in Eis und Schnee herzustellen, wird z. Zt. eine Vielzahl von Ankern in den verschiedenen Ausführungen verwendet (s. Tabellen 3.1 und 3.2). Die Ankertragfähigkeit beruht dabei jeweils auf den folgenden Faktoren /26/:

- Form des Ankers
- Größe des Ankers
- Gewicht des Ankers
- Einbindetiefe
- Belastungsgeschwindigkeit
- Belastungsdauer
- spezifische Eigenschaften des Einbettungsmediums

Die Berechnung der Tragfähigkeit erfordert daher die Berücksichtigung mehrerer Faktoren. Hironaka /26/ empfiehlt, bei praktischen Erprobungen von Ankern jeweils alle Faktoren konstant zu halten mit Ausnahme desjenigen, dessen Einfluß auf die Tragfähigkeit bestimmt werden soll. Auf diese Weise kann jeweils der Einfluß dieses Faktors allein für sich auf die

Ankertragfähigkeit bestimmt werden. Will man aber alle Einflußparameter gleichzeitig in einer Tragfähigkeitsuntersuchung erfassen, bedarf es komplexerer Untersuchungen, da eine reine Aufaddierung oder Aufmultiplikation der einzelnen Faktoren wegen ihrer Zusammengehörigkeit und ihrer gegenseitigen Abhängigkeit nicht möglich ist.

Mit analytischen Methoden für die Bestimmung der Ankertragfähigkeit von Erdankern können bei Verankerungen in Eis und Schnee Tragfähigkeitsberechnungen nicht durchgeführt werden, allein schon weil das viskoelastische Material Eis bzw. Schnee quantitativ anderen Gesetzmäßigkeiten gehorcht als die untersuchten Böden. So existieren nach den vorliegenden Unterlagen überhaupt keine Berechnungsmethoden zur Bestimmung der Tragfähigkeit von Zugankern in Eis und Schnee. Auch Kovacs, der mit einer Reihe von eingegrabenen Ankern in Grönland Versuche durchführte (s. 3.2.2), bewies die gute prinzipielle Anwendbarkeit dieser Anker in Polarschnee, ohne jedoch eine zulässige Belastung in Abhängigkeit von konstruktiven Parametern oder eine mathematische Lösung zur Voraussage von Kriechen oder Versagen anzugeben. Bemerkenswert ist das von ihm festgestellte Phänomen, daß bei unterschiedlichen Ankerplattendurchmessern die Anker mit kleineren Platten größere Verformungen pro Zeiteinheit hervorrufen, aber bei gleicher Belastung pro Fläche insgesamt geringere Verformungen.

Die Schlußfolgerungen von Hironaka (s. 3.2.2) aber zur Belastbarkeit von Kovacs' eingegrabenen Ankern mit 134 kN über längere Zeit bedürfen sehr kritischer Wertung. Die Verformungsgeschwindigkeiten der beschriebenen Anker mit $d = 25,4$ cm und $l_A = 1,83$ m liegen im Bereich von 0,5 bis 1,0 mm/min, so daß die Aussage, es sei unter Inkaufnahme hoher Verformungen möglich, mit einem solchen Anker 134 kN ohne ein schlagartiges Versagen aufzunehmen, zwar in dieser Form richtig ist, allerdings erfüllt ein solcher Anker in keinem Fall die an einen

Anker gestellte Aufgabe einer längerfristigen Tragfähigkeit, sondern ist allenfalls für einige Minuten bis wenige Stunden belastbar.

Die verschiedenen Formen der Erdanker führten zu drei prinzipiellen Gruppen von Ankertypen, die in Eis und Schnee anzuwenden sind:

- eingegrabene Anker (Sonderfall: Toter-Mann-Anker)
- Schraubenanker
- Verpreßanker.

Diese sollten nun erstmals systematischen Versuchen unterworfen und hinsichtlich ihrer Tragfähigkeit untersucht werden.

4. Vorversuche in der Antarktis, auf der Zugspitze und im Labor

4.1 Vorversuche während der Antarktis-Expedition 1979/80

4.1.1 Allgemeines

Die Antarktis-Expedition 1979/80 diente hauptsächlich zur Standorterkundung für die geplante deutsche Antarktisforschungsstation. Den teilnehmenden Wissenschaftlern war daher im Verlauf der ca. sechswöchigen Fahrt nur wenig Gelegenheit gegeben, ausgedehnte stationäre Versuche zu unternehmen. Die Vorversuche zu Zugankern in Eis und Schnee wurden vom Lehrstuhl für Bauverfahrenstechnik und Baubetrieb geplant und von Fuchs, Lindner durchgeführt /13/.

4.1.2 Versuche zur Herstellung von Eisplomben

Das Forschungsvorhaben sah vor, bei der Neuentwicklung eines Ankers möglichst auf an die Bedingungen der Antarktis angepaßte Bestandteile und Verfahren zurückzugreifen. Die Überlegung, das Prinzip eines Verpreßankers (s. 3.4) auch in Eis und Schnee anzuwenden, führte zu Versuchen, einen Verankerungskörper aus Eis herzustellen. Es sollte also der Mörtel des Verpreßankers hier durch Wasser ersetzt werden, das nach dem Gefrieren eine "Eisplombe" bilden und so die Kraftübertragung von der Ankerzugstange ins Schelfeis übernehmen sollte.

Mit einem SIPRE-Eisbohrer wurden vertikale Löcher $\varnothing$ 11,5 cm gebohrt. Nachdem das erste Bohrloch V1 (Tabelle 4.1) mit 32 l kaliumpermanganatgefärbtem Seewasser gefüllt worden war, wurde ersichtlich, daß aufgrund der Durchlässigkeit des Schnees keine Eisplombe gebildet werden konnte, da das Wasser unmittelbar versickerte. Daraufhin wurde versucht, mit verschiedenen Maßnahmen das Versickern des Wassers zu verhindern bzw. zu verzögern (Tabelle 4.1).

Zum damaligen Zeitpunkt war es mit den zur Verfügung stehenden Methoden jedoch nicht möglich, das Ziel der Bildung einer zusammenhängenden Eisplombe zu erreichen.

Tabelle 4.1: Bohrlochversuche zur Bildung einer Eisplombe /13/

Bohrloch Nr.	Höhe des Bohr- lochrandes unter OK Normal m	Bohrlochtiefe m	Präparierung des Bohrlochs	Wasser- menge l	Einfüll- zeit s	Bemerkungen
VI	1,50	1,0	keine	32	4 x 40 3 x 70	Bohrloch nach dem Einfüllen 17 cm tiefer
VI/A	1,50	0,5	Pappkarton auf Bohr- lochgrund	8	40	Wasser stieg kurzfristig auf 15 cm über Bohrlochgrund
VI/B	1,50	0,5	vor Einfüllen des Wassers mit losem Schnee aufge- füllt	8	23	Einfüllen des Wassers mit Gießkanne
VI/C	1,50	0,5	Bohrloch ca. 8 min mit Abgasen eines Bosch-2- Takt-Generators beheizt, Einfüll des Wassers am folgenden Tag	8	40	-

Allgemeine Werte:

Lufttemperatur $-5,7^{\circ}\text{C}$

Wassertemperatur $0,1 \dots -0,2^{\circ}\text{C}$

Schneetemperatur am Bohrlochgrund $\text{ca. } -8^{\circ}\text{C}$

Einfüllen durch Stahlrohr $\varnothing 8 \text{ cm}$ ca. 2 m Länge 10 cm über Bohrlochgrund

Um einen Aufschluß über die Verteilung des versickerten Wassers zu erhalten, wurde ein Vertikalschnitt in alle Bohrlochachsen bis in eine Tiefe von ca. 3 m unter OK Bohrloch gelegt (Bild 4.1).



Bild 4.1: Versickerungsverlauf der gefärbten Meerwasserfüllung in den Bohrlöchern V1, V1/A, V1/B und V1/C (von rechts nach links) /13/

4.1.3 Versuche mit Toter-Mann-Ankern

Da nur improvisierte Versuchseinrichtungen zur Verfügung standen und der Versuchsablauf so einfach wie möglich gestaltet werden sollte, wurde ein Schneeblock mit horizontaler Zugkraft belastet. Als Anker wurde Holz verschiedener Größe eingebaut (Tabelle 4.2).

Die aus Bretter bestehenden Anker wurden mit Kanthölzern an der Rückseite entsprechend ihren Abmessungen hinreichend ausgesteift. Die Zugkraft wurde zentrisch mit Hilfe von Stahl-

Tabelle 4.2: Charakteristische Werte der eingegrabenen Anker /13/

Bezeichnung	Material	Abmessung	Umfang m	Fläche ² m
a1	Kantholz	1,1 x 0,1 x 0,1	2,40	0,11
a2	Brett	0,44 x 0,22	1,32	0,096
a3	Bretter	0,67 x 0,33	2,00	0,2211
a4	Bretter	1,02 x 0,66	3,36	0,67

seilen eingeleitet. Der Angriffspunkt lag 1,50 m unter dem natürlichen Schneehorizont, die Ankerfläche war rechtwinklig zur Zugrichtung angeordnet. Die Löcher durch den Schneeblock wurden mit Rohren $\varnothing$ 4 cm durchgestoßen und die Zugseile eingefädelt, so daß das natürliche Schneegefüge kaum gestört wurde (Bild 4.2).

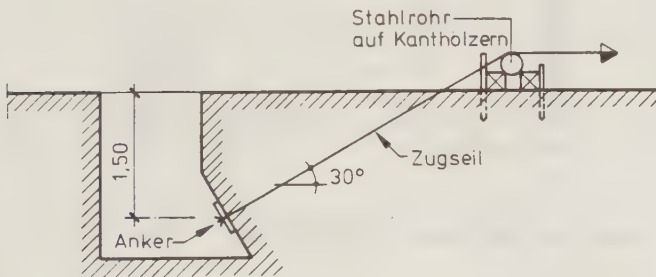


Bild 4.2: Prinzipskizze der Zugversuche

Als Zugvorrichtung stand die Elektrowinde eines Schneefahrzeuges mit einer Zugkraft von ca. 30 kN und einem ca. 50 m langen Stahlseil, als Meßeinrichtung eine Federwaage mit 500 kg Tragkraft zur Verfügung. Mit losen Rollen wurde ein Flaschenzug gebaut, so daß es möglich wurde, bis zu 30 kN Ankerzugkraft zu

messen. Die Umlenkung der Zugkrafttrichtung von 30° zur Winde erfolgte über ein auf Kanthölzern lagerndes Stahlrohr /13/.

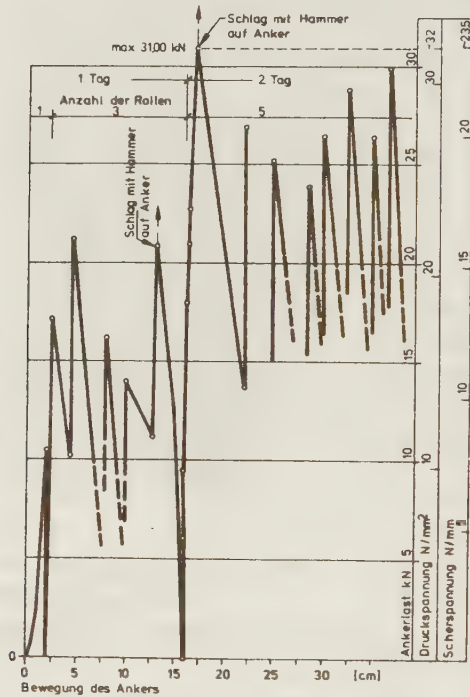


Bild 4.3: Last-Weg-Diagramm Anker a2 /13/

Aus Bild 4.3 ist ersichtlich, wie der Verlauf der Ankerbewegungen beim Anker a2 in Abhängigkeit von der aufgetragenen Belastung war. Die Annahme, daß der belastete Schneekeil unter einem Scherwinkel herausgepreßt würde, bestätigte sich nicht. Vielmehr war das aus dem Stahlbetonbau bekannte Phänomen des Durchstanzens zu beobachten. Das beim Durchziehen des Ankers entstandene Loch zeigte eine gleichförmige Wandung in der Form des Ankerkörpers.

Jeweils nach Erreichen einer Grenzlast ruckte der Anker unter hörbarem Knall eine kleine Strecke in Zugrichtung, um sich nach dem dadurch entstandenen Belastungsabfall erneut der Grenzlast zu nähern. Die erzielte Maximallast von ca. 31 kN am Beginn des zweiten Tages ließ einen Sintervorgang während der Ruhezeit von ca. 12 Stunden vermuten. Da die Meßvorrichtung bei 21,2 (mit 3 Rollen) bzw. 31 kN (mit 5 Rollen) ihre Grenzlast erreicht hatte, wurden weitere Ankerbewegungen mit Schlägen eines 800-g-Hammers provoziert. Die in Bild 4.3 für a2 gezeigte Belastung betrug im weiteren Verlauf ca. 30 kN maximal und ca. 20 kN minimal. Nach einem Gesamtweg von ca. 60 cm begann die Ankerplatte zu verkanten.

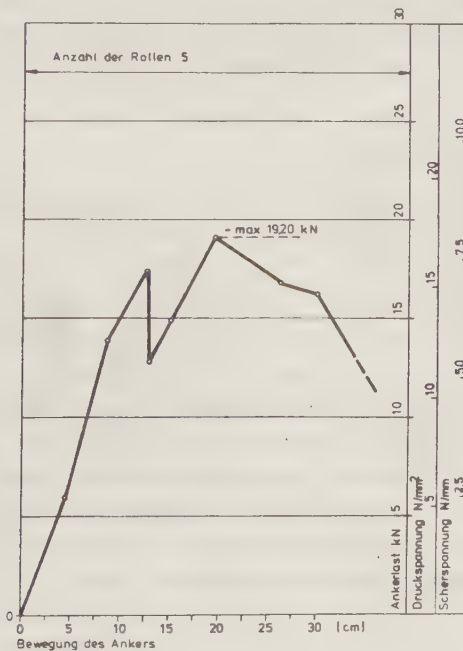


Bild 4.4: Last-Weg-Diagramm Anker a1 /13/

Beim Anker a1, der unter gleicher Versuchsdurchführung getestet wurde, kam es zu analogen Ergebnissen, aber die erreichten Belastungswerte waren geringer, wie Bild 4.4 zeigt. Da die Fläche und damit die aufnehmbare Druckspannung fast gleich waren, muß die höhere Tragfähigkeit des Ankers a2 durch den Formfaktor b/l ($a1: b/l = 0,5$; $a2: b/l = 0,09$), durch ein Veranken von a1 (Keilwirkung) oder durch den größeren Umfang, der zu geringerer Scherspannung führt, erklärt werden.

Nach den Ergebnissen der Zugversuche der Anker a1 und a2 mußte davon ausgegangen werden, daß mit der vorhandenen Versuchseinrichtung keine vergleichbaren Versuche durchgeführt werden konnten. Auf einen Einsatz des Ankers a3 wurde daher ganz verzichtet, während mit dem Anker a4 ein improvisierter Versuch zur Ermittlung eines Scherwinkels durchgeführt wurde (Bild 4.5).

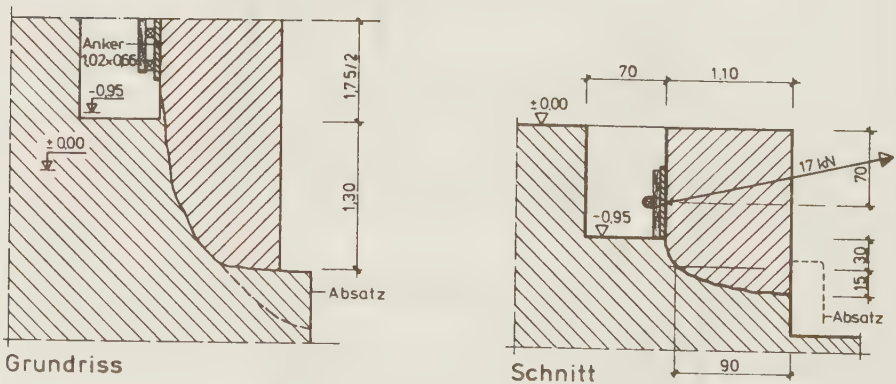


Bild 4.5: Scherbruch-Bild Anker a4 /13/

Der Schneeblock vor dem Anker brach bei einer Belastung von ca. 17 kN heraus. Infolge der unerwartet weit auslaufenden parabolischen Scherflächen war eine Beeinflussung im Auslauf-

bereich anzunehmen. Trotzdem ist der prinzipielle Verlauf gut zu erkennen. Das Scherbild (Bild 4.5) bestätigte, daß Schnee relativ große Zugspannungen aufzunehmen in der Lage ist. Bild 4.6 zeigt das Bruchbild, das beim Ausheben freigesägter Schneeblöcke entstand.

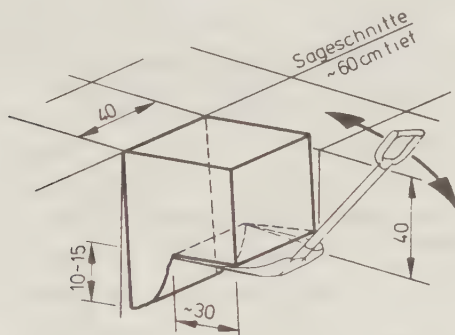


Bild 4.6: Bruchbild; Bruchverlauf auf Schneeblöcken aus 3 m Tiefe bei ca. -25°C /13/

Es ist also zu erkennen, daß bei Toter-Mann-Ankern zwei prinzipielle Versagensursachen existieren. Ist das Schelfeis, das die Zugkraft aufnimmt, ausreichend stark (durch eine große Einbindetiefe), stantzt sich der Anker durch das Schelfeis durch (vgl. Bilder 4.3 und 4.4). Wird die Einbindetiefe so gering gewählt, daß es aufgrund zu geringer Scherfestigkeit des verbliebenen Schneekegels gar nicht zu Kriechverformungen vor dem Versagen kommt, bricht das Schelfeis unter dem Zug des Ankers mit parabolischen Scherflächen (vgl. Bild 4.5).

4.2 Vorversuche auf dem Zugspitzplatt 1980

4.2.1 Allgemeines

Die Bedingungen auf dem Zugspitzplatt sind grundsätzlich verschieden von denen an der Georg-von-Neumayer-Station. Tabelle 4.3 zeigt einen Vergleich von gemessenen Schneetemperaturen in Abhängigkeit von der Tiefe zwischen Zugspitze und Georg-von-Neumayer-Station.

Tabelle 4.3: Vergleich der Schneetemperaturen von Zugspitze und Georg-von-Neumayer-Station

Tiefe m	GvN ♣ Februar	Zugspitze ♣ Oktober
Oberfl.- bereich	0 bis 13 °C	0 bis -4 °C
-1,0	-5 bis -8 °C	0 bis -2 °C
-2,0	-9 bis -10 °C	0 bis -2 °C

Daraus wird ersichtlich, daß ohne weiteres weder Ergebnisse aus Versuchen auf der Zugspitze auf die Antarktis zu übertragen sind noch umgekehrt. Notwendig waren diese Vorversuche jedoch, um prinzipielle Fragen des Verfahrens vorab klären zu können.

Die Überlegung, daß Anker, die einen Verankerungskörper aus Eis haben, eine höhere Tragfähigkeit haben als solche mit einem Verankerungskörper aus Schnee (s. 2). ließ an der Konzeption eines solchen Ankers festhalten. Bemühungen, die durch die Versuche von Fuchs und Lindner 1979/80 aufgeworfenen Probleme bezüglich des Versickern des Wassers im Schnee zu lösen, führten zu Vorversuchen mit Celluloseäthern, die die Viskosität des Wassers beträchtlich erhöhen und damit ein Versickern im Schnee verhindern sollten.

Messungen der Gefrierdauer einer solchen Eisplombe im Schnee

sollten Aufschluß darüber geben, nach welcher Zeit ein "Eisplombenanker" belastet werden kann. Außerdem wurde die bei der Expedition 1980/81 einzusetzende Versuchsausrüstung erprobt.

4.2.2 Versuche zur Wahl eines Celluloseäthers

Es standen mehrere Celluloseäther-Sorten in verschiedener Form und unterschiedlicher Viskosität der Lösung in Wasser zur Verfügung. Das Versickern im Schelfeis wurde vollständig verhindert durch die Lösung eines Carboxymethylcellulose-Äthers mit der Typenbezeichnung Walocel CRT 30.000 GA im Wasser. Dieses salzfreie, hochgereinigte und gut wasserlösliche Granulat entsteht durch Umsetzen von Alkalicellulose mit Chloressigsäure und Entfernen der entstehenden Salze durch Lösungsmittel und erhöht die Viskosität von Wasser bei einer 2 %-igen Lösung von 1,8 mPas bei einer Wassertemperatur von 0 °C auf ca. 30.000 mPas.

Bei einer durchschnittlichen Dichte des Schelfeises im Bereich bis -5 m von 460 kg/m^3 (s. 2.2) ergibt sich ein Porenanteil von 50 % /48/. Unter Berücksichtigung einer Korngröße von 1 - 2 mm /58/ im Schelfeis läßt sich der Durchlässigkeitskoeffizient k für Wasser im Schelfeis bestimmen zu $k \approx 10^{-3} \text{ m/s}$ (vergleichbar mit sandigem Kies), bei Verwendung des Carboxymethylcellulose/Wasser-Gemisches im Schelfeis zu $k \approx 5 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$ (vergleichbar mit Ton). Durchlässigkeitskoeffizienten $k < 10^{-7} \text{ m/s}$ bedeuten praktisch Undurchlässigkeit.

4.2.3 Erprobung einer Versuchseinrichtung

Bild 4.7 zeigt den Aufbau der Zugversuche am Beispiel des geplanten Eisplombenankers. Die Belastungseinrichtung bestand aus einem hydraulischen Hohlraumzylinder, der sich auf einer Traverse gegen den Schnee abstützte und durch eine Handpumpe

beaufschlagt wurde. Als Druckmedium wurde ein Hydrauliköl mit einem entsprechend niedrigen Stockpunkt gewählt.

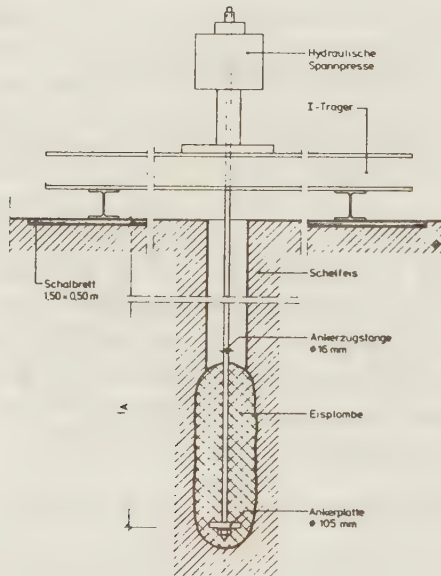


Bild 4.7: Prinzip der Versuchseinrichtung

Der Versuchsaufbau ist in Bild 4.8 dargestellt.

Die Spannweite der Traverse konnte mit 2,0 m relativ gering gewählt werden, da als Versagensursache nicht das Ausbrechen eines Schneekegels, das durch den gewählten Versuchsaufbau verhindert worden wäre, sondern das Herausziehen bzw. Durchstanzen der Eisplombe aus dem Schnee angenommen wurde (s. 4.1.3).

Als Meßvorrichtung wurden eine Meßuhr für die Kriechverformungen und 2 Meßmanometer für den aufgebrauchten Pressendruck gewählt.

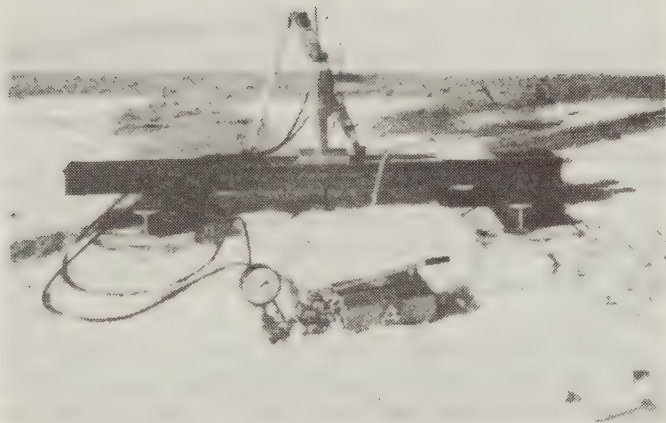


Bild 4.8: Versuchsaufbau 1980

Beim Protokollieren und Auswerten der Kriechverformungen des Ankers wurde hier wie auch in allen späteren Versuchen die Längenänderung des Ankerstahls $\varnothing$ 16 mm vernachlässigt, da sie bei einer Zugkraft von 42 kN und einem E-Modul von 210.000 N/mm^2 noch unter 1 o/oo liegt.

Obwohl die Spannpressen nach Erreichen des maximalen Hubs von 10 cm jeweils umgebaut werden mußte, erwies sich die gewählte Versuchseinrichtung als praktikabel.

4.2.4 Messung der Gefrierdauer einer Eisplombe

Zur genauen Bestimmung der Gefrierdauer wurden Messungen zum Abkühl- bzw. Gefrierprozeß in einem Bohrloch $\varnothing$ 13 cm mit einer Carboxymethylcellulose/Wasser-Lösung durchgeführt, die zu einem Wert von ca. 5 Tagen bis zum Erreichen der Umgebungstemperatur

führten, wobei ca. 85 % dieser Zeit für das Erstarren des Gemisches zu Eis gemessen wurden.

4.3 Ergänzende Versuche zur Eisfestigkeit

Um einen ersten Aufschluß darüber zu erhalten, ob und wie der Celluloseäther-Zusatz die Festigkeit des entstehenden Eises beeinflusst, wurden Bruchlastversuche mit dem bei der Frühfestigkeitsprüfung von Beton verwendeten Kaindl-Meyco-Gerät durchgeführt, wobei einerseits Eis aus Wasser, andererseits Eis aus Carboxymethylcellulose/Wasser-Lösung bis zum Bruch belastet und die aufgebrachte Zugkraft gemessen wurde. Tabelle 4.4 zeigt den Vergleich von Versuchen mit bzw. ohne Celluloseäther-Zusatz.

Tabelle 4.4: Versuche zur Bestimmung der Eisbruchfestigkeit

	ohne	mit
	Carboxymethylcellulose	
Bolzenlänge		
mm		150
Bolzendurchmesser		
mm		16
Kolbenfläche		
mm ²		1780
aufgenommene Zugkraft		
bar	55	90
aufgenommene Zugkraft		
kN	9,8	16,0

Danach wird durch die Zugabe von Carboxymethylcellulose die Zugfestigkeit von Eis um ca. 60 % gesteigert und der Vorteil der höheren Tragfähigkeit gegenüber Schnee noch weiter gesteigert.

4.4 Erste Ankerzugversuche während der Antarktis-Expedition 1980/81

4.4.1 Allgemeines

Im antarktischen Sommer 1980/81 wurden vom Lehrstuhl für Bauverfahrenstechnik und Baubetrieb in der Umgebung der Georg-von-Neumayer-Station die ersten in-situ-Zugversuche durchgeführt. Es sollten folgende Ankersysteme getestet werden (Bild 4.9):

1. ein Ankersystem, bei dem in einem Bohrloch eine Zugstange mit Ankerplatte mittels rückverfülltem, verdichtetem Schnee eingebaut wird,
2. einen Schraubenanker, eine Verankerungsart, die schon häufiger für Zugverankerungen in Eis und Schnee verwendet wurde,
3. der vom Lehrstuhl für Bauverfahrenstechnik und Baubetrieb neu entwickelte Eisplombenanker,
4. ein ebenfalls vom Lehrstuhl für Bauverfahrenstechnik und Baubetrieb neu entwickelter Klappanker, der nach dem Prinzip eines Hohlraumdübels arbeiten sollte. Diese Versuche mit dem Klappanker mußten aus zeitlichen und logistischen Gründen entfallen.

Die Anker 2 und 4 sind sofort nach dem Einbau belastbar, bei Anker 1 muß ca. 1 Tag und beim Anker 3 müssen ca. 5 - 6 Tage bis zur Belastung gewartet werden.

Es wurde bei den Ankerzugversuchen mit den Ankern 1 bis 3 die in 4.2.3 beschriebene Versuchseinrichtung ohne größere technische Probleme verwendet. Es stellte sich aber heraus, daß beim Aufbringen der Pressenkraft mittels Handpumpe aufgrund der aufgezwungenen Verformung des Ankers der Pressendruck sank. Daher mußte der Pressendruck ständig kontrolliert und von Hand nachreguliert werden. Die Versuche wurden abgebrochen, wenn die auftretenden Verformungen so groß wurden, daß ein Messen

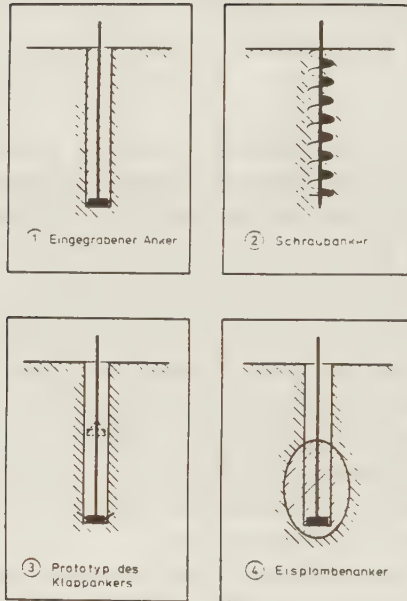


Bild 4.9: Prinzipskizzen der vier während der Antarktis-Expedition 1980/81 zu testenden Ankersysteme

der Verformungen, der Zeit und des Pressendrucks bei gleichzeitigem Nachregulieren des Pressendrucks unmöglich wurde.

Die verwendete Presse hatte folgende technische Daten:

Kolbenfläche:

$$F_K = 50,30 \text{ cm}^2$$

Reibungsverlust in der Presse:

$$0 \text{ bis } 50 \text{ bar: } R_V = 20 \%$$

$$50 \text{ bis } 100 \text{ bar: } R_V = 15 \%$$

$$100 \text{ bis } 150 \text{ bar: } R_V = 9 \%$$

$$150 \text{ bis } 200 \text{ bar: } R_V = 0 \%$$

So ergab sich der wirksame Pressendruck zu

$$P_{\text{tats}}(\text{kN}) = P_{\text{anz}}(\text{bar}) \times F_K(\text{cm}^2) \times (100 - R_v(\%)) \times 10^{-4}$$

Damit ergaben sich die tatsächlichen Ankerzugkräfte in Abhängigkeit vom angezeigten Pressendruck wie in Tabelle 4.5 angegeben.

Tabelle 4.5: Tatsächliche Ankerzugkräfte P_{tats} in Abhängigkeit vom angezeigten Pressendruck P_{anz}

P_{anz} bar	P_{tats} kN
20	8,05
25	10,06
30	12,07
40	16,10
50	20,12
60	25,65
70	29,93
75	32,07
80	34,20
100	42,76
120	54,93
125	57,22
140	64,08
150	68,66
175	88,03

4.4.2 Ankerzugversuche mit eingegrabenen Ankern

Bei der Vielfalt der möglichen Varianten von eingegrabenen Ankern mußte ein System gewählt werden, das einen Vergleich mit den anderen getesteten Zugankersystemen erlaubte. Es wurde daher ein Spannstahl $\varnothing 16$ mm mit einer Ankerplatte in ein Bohrloch eingebracht, das dann mit lageweise verdichtetem

Schnee rückverfüllt wurde (Bild 4.10). Die Zugkraft wird bei diesem eingegrabenen Anker vom verdichteten wiederverfüllten Schnee aufgenommen, der über eine ausreichende Scherfestigkeit verfügt.

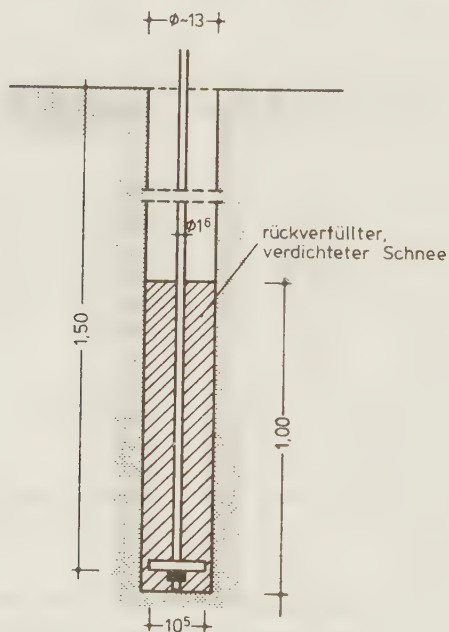


Bild 4.10: Eingegrabener Anker, Antarktis Expedition 1980/81

Bild 4.11 zeigt die Kriechkurven der einzelnen Ankerzugversuche.

Aus Tabelle 4.6 sind die Einzelheiten der Versuche mit eingegrabenen Ankern zu entnehmen.

Die durchgeführten Versuche waren Kurzzeitversuche. Die Anker wurden mit stufenweise erhöhter Belastung getestet. Ein Lang-

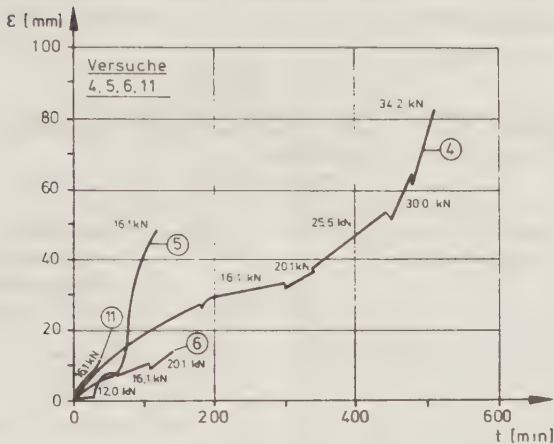


Bild 4.11: Ankerzugversuche mit eingegrabenen Ankern während der Antarktis-Expedition 1980/81 mit Angabe der jeweiligen Laststufen

zeitverhalten unter konstanter Last konnte aus zeitlichen und logistischen Gründen nicht untersucht werden.

Bei den Versuchen erreichten die Verformungsgeschwindigkeiten nach einer Anfangsverformung ϵ_0 einen Wert $\dot{\epsilon}_2$, der von der aufgetragenen Belastung abhing. Es stellten sich zum Teil bereits bei 16,1 kN erhebliche Verformungsgeschwindigkeiten ein.

Es läßt sich feststellen, daß eine größere Einbindetiefe die Tragfähigkeit des eingegrabenen Ankers erhöhen wird. Ebenso wird die Größe der Ankerplatte die Tragfähigkeit entscheidend beeinflussen, so daß eine größere Ankerplatte zu sehr viel besseren Ergebnissen hinsichtlich Verformung, Verformungsgeschwindigkeit und Tragfähigkeit führen wird.

Der eingegrabene Anker in der hier untersuchten Form sollte

Tabelle 4.6: Versuchsbeschreibung der Ankerzugversuche mit eingegrabenen Ankern bei der Antarktis-Expedition 1980/81

Versuch Nr.	Ankerloch gebohrt	Anker eingebaut	Anker belastet	mittlere Kriechgeschwindigkeit mm/min	max. Last kN	Bemerkungen
4	27.1.81	27.1.81 18.40 Uhr	5.2.81 9.50 Uhr	0,427	34,20	max. 68,66 kN erreicht, Verformungen nicht mehr meßbar, Anker kriecht schnell
5	27.1.81 18.40 Uhr $l_A = 1,85 \text{ m}$	27.1.81 18.50 Uhr	4.2.81 11.10 Uhr	1,080	16,10	nur Laststufe 40 bar (= 16,10 kN)
6	27.1.81 18.50 Uhr $l_A = 1,90 \text{ m}$	27.1.81 19.10 Uhr	30.1.81 17.30 Uhr	0,149	20,12	-
11	5.2.81 15.00 Uhr $l_A = 1,95 \text{ m}$	5.2.81 15.30 Uhr	6.2.81 13.40 Uhr	0,343	16,10	Anker wurde offensichtlich zu früh belastet

einige Tage nach seinem Einbau unbelastet gelassen werden, damit der wiederverfüllte und verdichtete Schnee wieder anfrieren kann.

4.4.3 Ankerzugversuche mit Schraubenankern

Der verwendete Schraubenanker bestand aus einem Stahlstab, an dessen unterem Ende sich eine schraubenförmig verdrehte Ankerplatte befand (Bild 4.12).

Der Anker wurde von der Oberfläche aus in den Schnee eingeschraubt, wobei sich zwei der getesteten Anker stark verbogen, als sie auf eine Eisschicht stießen.

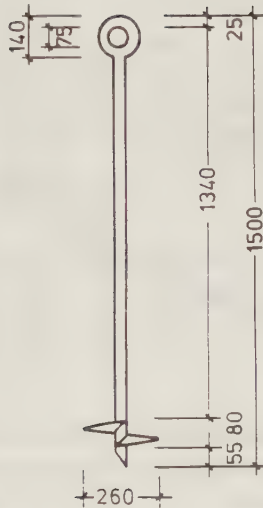


Bild 4.12: Schraubenanker Antarktis-Expedition 1980/81

Der Schraubenanker ist sofort nach Einbau belastbar, die auf-
gebrachte Zugbelastung wird über die Ankerplatte direkt in
das ungestörte Schelfeis übertragen.

Die Kriechkurven der durchgeführten Versuche sind in den Bil-
dern 4.13 und 4.14 dargestellt.

Die Versuchsbeschreibung der einzelnen Versuche mit Schrau-
benankern sind Tabelle 4.7 zu entnehmen.

Auch die mit Schraubenankern durchgeführten Versuche waren
Kurzzeitversuche. Die Ergebnisse waren qualitativ ähnlich
denen der Versuche mit eingerabenen Ankern (4.4.2), auch hier
stellten sich nach einer Anfangsverformung Verformungsge-
schwindigkeiten $\dot{\epsilon}_2$ ein, die in ihrer Größe von der jeweils

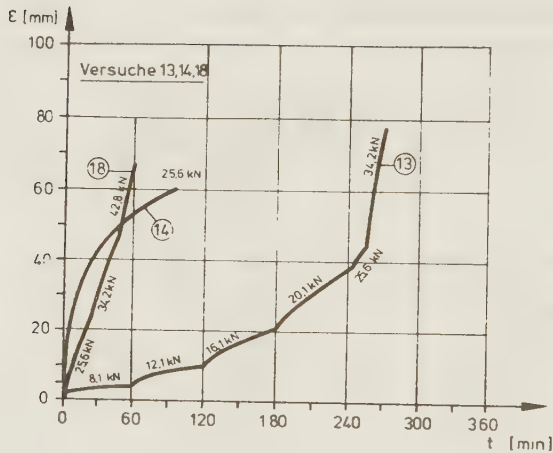


Bild 4.13: Ankerzugversuche mit Schraubenankern bei der Antarktis-Expedition 1980/81 mit Angabe der jeweiligen Laststufen

aufgebrachten Belastung abhingen. Allerdings waren die beim Schraubenanker gemessenen Verformungen und Verformungsgeschwindigkeiten bezogen auf die Größe der Ankerplatte erheblich höher als die beim eingegrabenen Anker ermittelten.

Auch beim Schraubenanker wird eine größere Einbindetiefe die Tragfähigkeit erhöhen. Eine weitere Vergrößerung der Ankerplatte wird zu besseren Ergebnissen führen.

Ein Vorteil des Schraubenankers ist seine Belastbarkeit unmittelbar nach dem Einbau. So wird der Schraubenanker bei kurzfristigen Einsätzen oder bei sofort erforderlicher Verankerungsfähigkeit trotz der gegenüber eingegrabenen Ankern geringeren Tragfähigkeit seine Anwendung finden.

Die kurzzeitig aufnehmbare Spitzenlast scheint auf den ersten

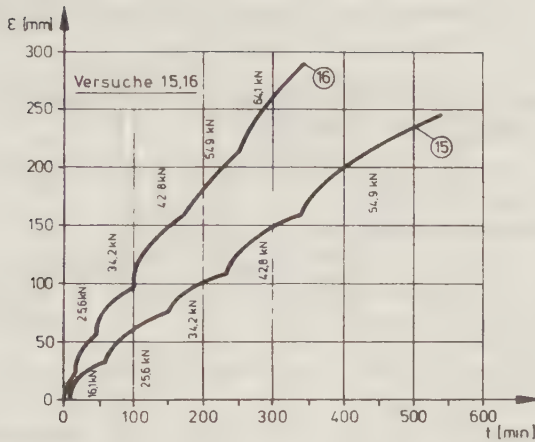


Bild 4.14: Ankerzugversuche mit Schraubenankern bei der Antarktis-Expedition 1980/81 mit Angabe der jeweiligen Laststufen

Blick beim Schraubenanker sogar größer zu sein als beim eingegrabenen Anker (vgl. Tabellen 4.6 und 4.7). Dies täuscht jedoch über die beim Schraubenanker wesentlich höheren Verformungen bzw. Verformungsgeschwindigkeiten hinweg, die für eine über einen langen Nutzungszeitraum andauernde Tragfähigkeit ausschlaggebend sind.

Außerdem hatte der eingegrabene Anker eine Ankerplatte $\varnothing 105$ mm, der Schraubenanker jedoch eine Ankerplatte $\varnothing 260$ mm. Bezieht man die erzielten Werte für Tragfähigkeit, Verformung und Verformungsgeschwindigkeit beider Ankertypen auf eine Ankerplattengröße, wird der Vorteil des eingegrabenen Ankers gegenüber dem Schraubenanker noch größer.

Ursache dieser doch wesentlich besseren Eigenschaften des eingegrabenen Ankers ist die höhere Festigkeit des rückverfüll-

Tabelle 4.7: Versuchsbeschreibung der Ankerzugversuche mit Schraubenankern, Antarktis-Expedition 1980/81

Versuch Nr.	Anker eingebaut	Anker belastet	mittlere Kriechgeschwindigkeit mm/min	max. Last kN	Bemerkungen
13	6.2.81 14.00 Uhr $l_A = 1,50 \text{ m}$	8.2.81 11.00 Uhr	2,244	34,20	-
14	6.2.81 14.10 Uhr $l_A = 1,50 \text{ m}$	8.2.81 16.10 Uhr	0,192	25,65	nur Laststufe 60 bar (= 25,65 kN)
15	6.2.81 14.20 Uhr $l_A = 1,50 \text{ m}$	10.2.81 10.45 Uhr	0,270	54,93	beim Ausbau der Anker 15 und 16 am 12.2.81 stellte sich heraus, daß die Anker stark verbogen waren Ursache: Eisschichten im Schnee
16	9.2.81	11.2.81 12.00 Uhr	0,612	64,08	

ten, verdichteten Schnees, der beim eingegrabenen Anker die Zugkraft aufnimmt, gegenüber dem beim Schraubenanker direkt belasteten Schelfeis, dessen Gefüge zudem durch das Einschrauben des Schraubenankers gestört ist.

4.4.4 Ankerzugversuche mit Eisplombenankern

Mit einem SIPRE-Eisbohrer $\varnothing 11,5 \text{ cm}$ wird im Schelfeis ein Bohrloch bis zur gewünschten Tiefe hergestellt. In das Bohrloch, bei dem sich ein Durchmesser von ca. 13 cm einstellt, wird ein Spannstahl $\varnothing 16 \text{ mm}$ mit einer Ankerplatte eingebracht. Wird das Bohrloch mit durch Schmelzen von Schnee gewonnenem Wasser gefüllt, gefriert dieses und bildet eine Eisplombe, die als Verankerungskörper die Kraftübertragung in das Schelf-

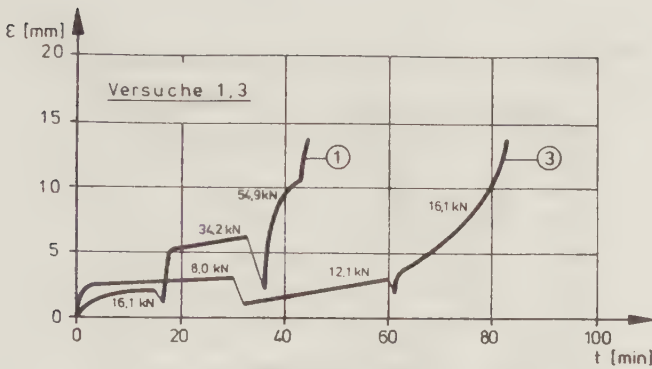


Bild 4.15: Ankerzugversuche mit Eisplombenankern; Kriechkurven der Versuche 1 und 3, Antarktis-Expedition 1980/81, mit Angabe der jeweiligen Laststufen

eis übernimmt. Um das Versickern des Wassers im porösen Eis zu verhindern, wird ihm ein Celluloseäther-Granulat zugesetzt (s. 4.2.2). Das Granulat wird eingerührt, bis ein klumpenfreies, zähes Gemisch entsteht, das in das Bohrloch eingeschüttet wird. Nach ca. 5 Tagen ist das Gemisch im Bohrloch gefroren, die Eisplombe hat sich gebildet und der Anker kann belastet werden (s. Bild 4.7).

Die Bilder 4.15, 4.16 und 4.17 zeigen die Kriechkurven dieser Zugversuche; der Tabelle 4.8 sind die Einzelheiten dieser Versuche zu entnehmen.

Mit Ausnahme des Anker Nr. 3 zeigten sich bis ca. 32,1 kN in der untersuchten Belastungsperiode keine Ansätze von beschleunigter Verformung. Die jeweils bei gleicher Belastung ermittelten Verformungen und Verformungsgeschwindigkeiten waren erheblich geringer als bei Schrauben- und eingegrabenen Ankern (vgl. Bilder 4.11 und 4.13 bis 4.17).

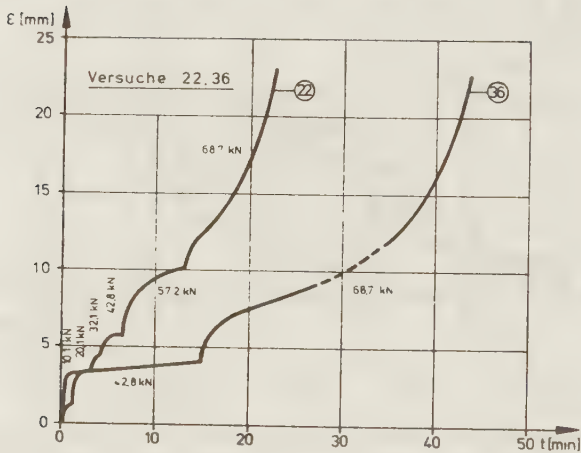


Bild 4.16: Ankerzugversuche mit Eisplombenankern; Kriechkurven der Versuche 22 und 36, Antarktis-Expedition 1980/81, mit Angabe der jeweiligen Laststufen

Der Eisplombenanker ist zudem einfach und kostengünstig herzustellen, erfüllt damit wichtige Voraussetzungen für den Einsatz in der Antarktis. Allerdings muß man vom Einbau des Ankers bis zu seiner Belastung ca. 5 bis 6 Tage warten (s. 4.2.4).

Bei Einsätzen, bei denen es auf langfristige und hohe Belastbarkeit und nicht auf eine schnell verfügbare Verankerung ankommt, ist der Eisplombenanker Schraubenankern und eingegrabenen Anker überlegen. Auch beim Eisplombenanker gilt, daß sich bei größerer Einbindetiefe und größerer Ankerplatte die Tragfähigkeit des Ankers verbessern wird.

Vergleicht man die Verformungsgeschwindigkeiten des Eisplom-

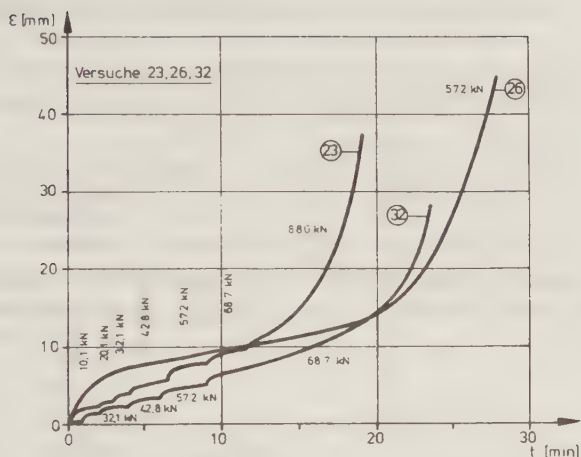


Bild 4.17: Ankerzugversuche mit Eisplombenankern; Kriechkurven der Versuche 23, 26 und 32, Antarktis-Expedition 1980/81, mit Angabe der jeweiligen Laststufen

benankers mit denen des Schraubenankers, wird deutlich, daß bei gleicher Belastung der Eisplombenanker sich noch im sekundären Kriechbereich befindet, während der Schraubenanker längst im tertiären Kriechstadium ist (vgl. z.B. Versuch 13, Bild 4.13, und Versuch 1, Bild 4.15, bei 34,2 kN). Auch hier ist ein solcher Vergleich wegen der größeren Ankerplatte des Schraubenankers noch zu relativieren.

Gegenüber dem eingegrabenen Anker ist der Vorteil des Eisplombenankers nicht ganz so groß. Bei näherer Betrachtung der gemessenen Verformungen und Verformungsgeschwindigkeiten sieht man, daß der Eisplombenanker hier wesentlich geringere Werte bei gleicher Belastung aufweist. Die Ursache dieser gegenüber eingegrabenen Ankern noch weitaus besseren Trageigenschaften

Tabelle 4.8: Versuchsbeschreibung der Ankerzugversuche mit Eis-plombenankern, Antarktis-Expedition 1980/81

Versuch Nr.	Ankerloch gebohrt	Anker eingebaut	Anker belastet	mittlere Kriechgeschwindigkeit mm/min	max. Last kN	Bemerkungen
1	27.1.81 $l_A = 2,00 \text{ m}$	28.1.81 14.30 Uhr	5.2.81 22.30 Uhr	2,30	54,93	- 20 l (=20 kg) Wasser (6°C) - 400 g CRT 30.000 G (= 2%-ige Lösung), gute Auflösung
2	27.1.81 11.45 Uhr	27.1.81 16.20 Uhr	5.2.81 14.20 Uhr	0,012	29,93	- 20 l (=20 kg) Wasser (18°C) - 400 g CRT 30.000 G (= 2%-ige Lösung), sehr klumpig - bei 200 bar (=100,6 kN) 1. Knall - bei 260 bar (=130,78 kN) lauter Knall mit sofortigem Druckabfall (Schweißnaht gebrochen)
3	27.1.81 $l_A = 1,70 \text{ m}$	27.1.81	31.1.81 13.00 Uhr	0,782	16,10	- 18 l Wasser (2% CRT) - Anker versagt, geringe Festigkeit, zu früh belastet
21		8.2.81	14.2.81 20.00 Uhr	0,45	42,76	- 20 l Wasser (2% CRT) - 15 min Quellzeit bei 11°C
22		8.2.81	14.2.81 16.30 Uhr	9,16	68,66	- s. Bemerkung Vers. Nr. 21
23		8.2.81	...2.81 14.30 Uhr	5,36	88,03	- s. Bemerkung Vers. Nr. 21
24	$l_A = 1,90 \text{ m}$	10.2.81 22.00 Uhr	16.2.81 13.00 Uhr	5,95	57,22	- 20 l Wasser (6°C) - 5 min Quellzeit
26	$l_A = 1,80 \text{ m}$	10.2.81 22.05 Uhr	16.2.81 19.00 Uhr	5,90	57,22	- s. Bemerkung Vers. Nr. 24
32			24.2.81 14.30 Uhr	7,05	68,66	-
34			24.2.81 16.00 Uhr	2,39	68,66	-
36			24.2.81 17.00 Uhr	1,83	68,66	-

ist in erster Linie die gegenüber verdichtetem Schnee viel größere Festigkeit des Eises (vgl. 2 und 4.3).

4.4.5 Zusammenfassung

Bild 4.18 zeigt Kriechkurven für eingegrabene Anker, Schrauben- und Eisplombenanker, die sich ergeben, wenn man die Versuche der Antarktis-Expedition 1980/81 hinsichtlich ihrer Verformungen und Verformungsgeschwindigkeiten unter den jeweiligen Belastungen zusammenfaßt.

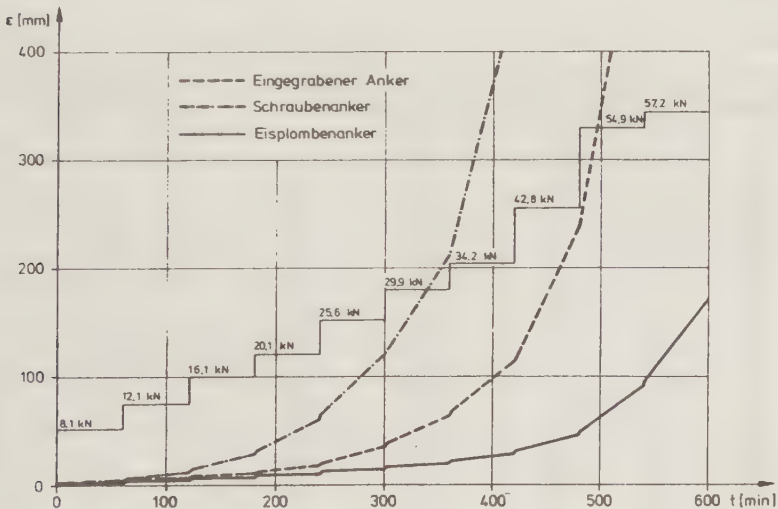


Bild 4.18: Vergleich der Kriechkurven von eingegrabenen Ankern, Schrauben- und Eisplombenankern bei den verschiedenen Laststufen

Sehr deutlich werden hier das schlechte Tragverhalten des Schraubenankers, das sehr viel bessere des eingegrabenen

Ankers und das noch viel bessere des Eisplombenankers. Das Ergebnis dieser Untersuchung war, daß bei der folgenden Antarktis-Expedition der Eisplombenanker allein weiter getestet und auf Verbesserungsmöglichkeiten der Konstruktion und der Einbautechnologie hin untersucht werden sollte.

5. Zugversuche mit Eisplombenankern während der Antarktischen Expedition 1982/83

5.1 Allgemeines

Die im folgenden beschriebenen Versuche fanden in der Zeit vom 1. bis 28. Februar 1983 in der unmittelbaren Umgebung der Georg-von-Neumayer-Station statt. Die in dieser Zeit herrschenden Temperaturen im Schelfeis sind Bild 2.4 zu entnehmen. Insgesamt wurden 32 Eisplombenanker in Zugversuchen zur Ermittlung konstruktiver Einflüsse auf das Verformungsverhalten getestet. Die Einbauparameter der einzelnen Anker sind in Tabelle 5.1 aufgeführt.

Tabelle 5.1: Einbauparameter der Zugversuche mit Eisplombenanker

uch	Ankerlänge l_A	Volumen der Mischung V_G	Einfüll- tempera- tur T_G	Verankerungs- länge l	rechner. Durch- messer der Eis- plombe D_0	Ankerplatten- durchmesser d	Neigung α	Fläche der Ankerplatte	Umfang der Ankerplatte
	m	l	°C	m	cm	mm	°	mm ²	mm
1	1,55	12,0	8	1,00	13,0	105	90	8458	329,9
2	1,55	12,0	8	1,00	13,0	105	90	8458	329,9
2	1,55	12,0	8	0,90	13,7	105	90	8458	329,9
	1,55	12,0	6	0,95	13,3	105	90	8458	329,9
	3,50	17,5	20	1,10	14,3	100	90	7653	314,2
	1,55	17,5	3	0,85	17,0	105	90	8458	329,9
	1,55	12,0	8	0,90	13,7	105	90	8458	329,9
	1,55	12,0	8	0,95	13,3	105	90	8458	329,9
	1,55	12,0	21	0,75	15,0	105	90	8458	329,9
	1,55	12,0	35	0,35	21,9	105	90	8458	329,9
	1,00	11,0	8	0,65	15,4	42	90	1184	131,9
	1,50	12,0	8	0,75	15,0	42	90	1184	131,9
	2,00	12,0	8	0,90	13,7	42	90	1184	131,9
	2,50	12,0	8	1,60	10,2	42	90	1184	131,9
	3,00	12,0	8	0,90	13,7	42	90	1184	131,9
	3,50	12,0	8	2,20	8,7	42	90	1184	131,9
	1,55	7,5	6	0,55	13,8	105	90	8458	329,9
	1,55	10,0	5	0,75	13,7	105	90	8458	329,9
	1,55	12,5	4	0,80	14,8	105	90	8458	329,9
	1,55	15,0	9	1,05	14,1	105	90	8458	329,9
	1,55	17,5	8	0,85	17,0	105	90	8458	329,9
	1,55	20,0	3	1,40	14,1	105	90	8458	329,9
	1,50	12,0	7	1,00	13,0	105	90	8458	329,9
	2,00	12,0	7	1,00	13,0	105	90	8458	329,9
	2,50	12,0	6	0,80	14,5	105	90	8458	329,9
	3,00	12,0	6	0,90	13,7	105	90	8458	329,9
	1,55	15,0	9	1,05	14,1	105	80	8458	329,9
	1,55	15,0	1	1,05	14,1	105	50	8458	329,9
	1,50	12,0	7	1,00	13,0	68	90	3431	213,6
	1,50	12,0	7	0,95	13,3	98 x 98	90	9403	392,0
	1,55	17,5	26	0,45	23,3	105	90	8458	329,9
	1,55	17,5	16	0,70	18,7	105	90	8458	329,9

Die jeweils zu einer Versuchsreihe gehörenden Anker wurden zur gleichen Zeit und an benachbarten Orten eingebaut und unmittelbar nacheinander belastet, um übereinstimmende Versuchsbedingungen zu schaffen.

Aufgrund der guten Ergebnisse bei der Erprobung und um Vergleichsmöglichkeiten mit Versuchsergebnissen der Antarktis-Expedition 1980/81 zu haben, wurde für die Antarktis-Expedition 1982/83 prinzipiell die gleiche Versuchseinrichtung verwendet wie 1980/81; es wurde aber ein hydraulisches Antriebsaggregat eingesetzt, das den Betriebsdruck an der Spannpressse automatisch konstant halten konnte (Bild 5.1).



Bild 5.1: Versuchsaufbau 1982/83

So traten die Probleme, die 1980/81 wegen des durch Ankerkriechen hervorgerufenen Druckabfalls beim Aufbauen des Pressendrucks mittels Handpumpe (s. 4.4.1) entstanden waren, nicht mehr auf.

Tabelle 5.2 zeigt die technischen Daten der eingesetzten

Spannpresse und Tabelle 5.3 Reibungsverluste und tatsächlich wirkende Zugkräfte in Abhängigkeit vom angezeigten Pressendruck.

Tabelle 5.2: Technische Daten der Spannpresse

Bezeichnung		Dywidag Spannpresse 25 Mp Serie 01
Stahl- ϕ	mm	16
Stahlgüte	N/mm ²	1325/1470
max. Spannkraft	kN	245
Kolbenfläche beim Spannen	cm ²	50,3
zul. Betriebs- druck	bar	500,0
zul. Rückhol- druck	bar	80,0
max. Hub	mm	100,0

Tabelle 5.3: Reibungsverluste R_v und tatsächliche Ankerzugkräfte in Abhängigkeit vom angezeigten Pressendruck

P _{anz} bar	R %	P _{tats} kN
25	18,0 ^x	10,31 ^x
50	18,0	20,62
75	17,0	31,31
100	11,0	44,77
125	8,0	57,85
150	6,0	70,92
175	4,5	84,06
200	3,0	97,58

^x - unsichere Werte

5.2 Versuche zum Versagensmechanismus

5.2.1 Versagensvorgang beim eingegrabenen Anker

Bei geringer Zugkraft oder bei ausreichend großer Einbindetiefe stanzte sich der eingegrabene Anker durch das rückverfüllte, verdichtete Eis durch (s. 4.1.3).

Bei zu geringer Einbindetiefe, also dann, wenn die aufgebrachte Zugkraft größer als die Scherfestigkeit des belasteten Schelfeisbereiches ist, bricht das Schelfeis unter dem Zug des Ankers ungefähr kegelförmig (s. Bild 4.5).

Die unter 3.2.2 beschriebenen Versuche von Kovacs mit eingegrabenen Ankern zeigten jeweils das in Bild 5.2 dargestellte Bruchbild. Die Scherflächen stellten sich dabei unter $30^\circ - 45^\circ$ zur Schneeoberfläche ein /36/.

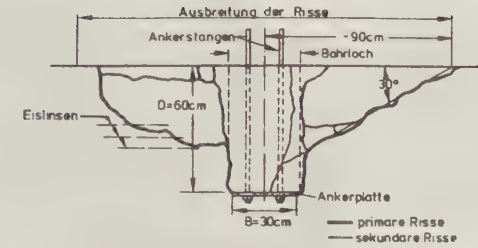
5.2.2 Versagensvorgang beim Schraubenanker

Es liegen keine Untersuchungen über das Versagensprinzip beim Schraubenanker vor; es wird sich aber der gleiche Versagensmechanismus wie beim eingegrabenen Anker einstellen (s. 5.2.1).

5.2.3 Versagensvorgang beim Eisplombenanker

Bei Versuchen zur Ermittlung des Versagensvorgangs beim Eisplombenanker ergab sich bei einer Belastung von ca. 80 kN bei einer Ankerlänge von ca. 0,55 m das in Bild 5.3 dargestellte Bruchbild mit Bruchwinkeln von ca. 30° .

Um jedoch bei einer Ankerlänge $l_A = 1,50$ m einen Schneekegel unter 70° aus dem Schelfeis zu brechen, ist bei einer Scher-



a) Schnitt A-A



b) Draufsicht

Bild 5.2: Risse im Schnee an der Oberfläche des Ankers Nr. 5 nach dessen Versagen nach Kovacs 1967 /36/

festigkeit von $\tau = 0,1 \text{ N/mm}^2$ eine Zugkraft von mindestens 280 kN erforderlich. Da die bei allen Zugversuchen aufgetragenen Belastungen aber unter 100 kN lagen, war ein solches Herausbrechen eines Schneekegels, das durch die Traverse mit ihrer Auflagerlänge von 2,0 m ja verhindert worden wäre, als Versagensursache nicht möglich. Daher wurde die zweite Möglichkeit, das Herausziehen der Eisplombe aus dem Schelfeis,

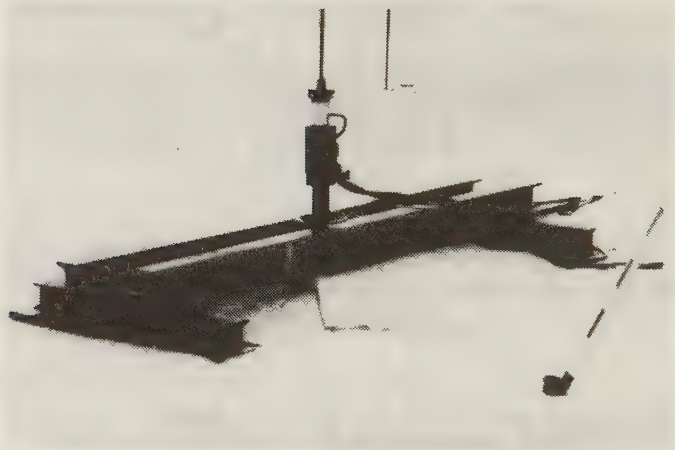
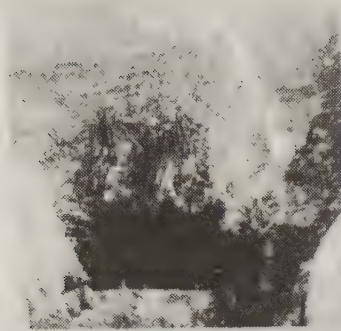


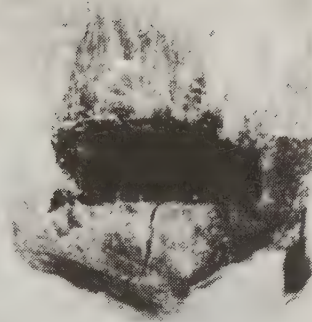
Bild 5.3: Bruchbild an der Oberfläche beim Versagen eines Eisplombenankers

als Versagen angenommen. Bei Zugversuchen, bei denen der Anker durch einen Schacht zur Hälfte freigelegt wurde, konnte das tatsächliche Verhalten von Eisplombe und Stahlzugglied bzw. Ankerplatte beobachtet werden. Bild 5.4 zeigt Aufnahmen verschiedener Stadien des Ankerverhaltens. Bei konstanter Zugbelastung von ca. 45 kN bilden sich zunächst feine Rißflächen in der Eisplombe von der Ankerplatte nach außen, die durch geringfügiges Anheben der gesamten Eisplombe entstehen. Dann wird die Ankerplatte unter Komprimierung des Bereiches oberhalb der Ankerplatte durch die Eisplombe hindurchgestanzt. Der entstehende Kanal ist nahezu exakt zylinderförmig. In Bild 5.5 ist der Vorgang als Prinzipskizze dargestellt.

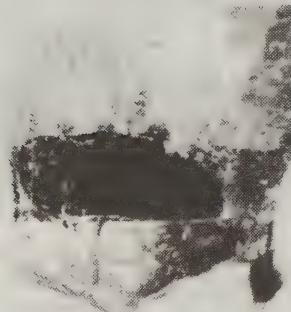
Unter 2.1 wurde das Phänomen der Regulation des Eises anhand des Phasendiagramms erläutert. Innerhalb des Temperaturbereiches von 0 ... -20 °C sind demnach Drücke von 0 ... 200 N/mm² erforderlich, um Eis zum Schmelzen zu bringen. Bei den



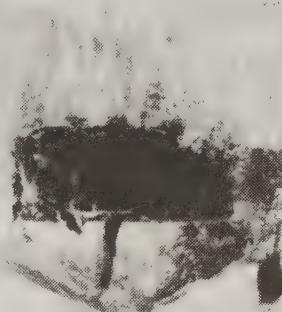
I



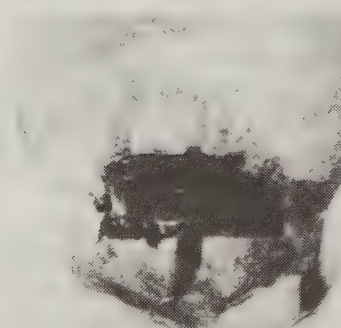
II



III



IV



V



VI

Bild 5.4: Stadien des Ankerkriechens bei konstanter Zugbelastung von ca. 45 kN

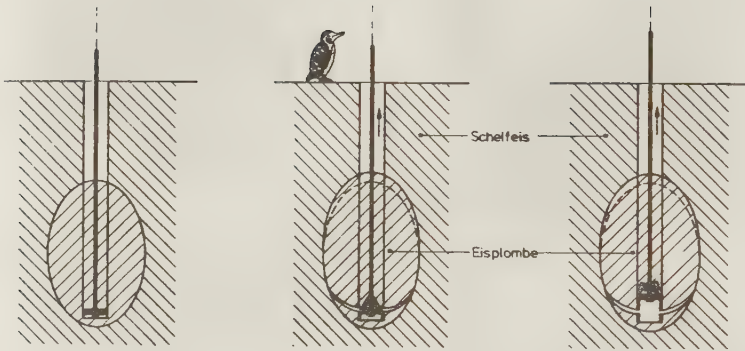


Bild 5.5: Prinzip des Ankerversagens beim Eisplombenanker

Ankern mit $l_A = 1,50 - 1,55$ m beträgt die Eistemperatur oberhalb der Ankerplatte ca. $-8 \dots -9,5$ °C, das heißt, es reicht ein Druck von $80 - 95 \text{ N/mm}^2$ auf die Eisplombe, um im Druckausbreitungsbereich das Eis zu schmelzen. Wird dieser Druck reduziert oder weggenommen, gefriert das Eis sofort wieder.

Bei einer Ankerplatte $d = 105$ mm wird dieser für die Regelation erforderliche Druck aber erst bei einer Zugbelastung von 677 kN erreicht, so daß eine Regelation nicht stattfinden kann. Allerdings reichen die auf die Eisplombe aufgebrachten Drücke aus, um das Eis innerhalb des Druckausbreitungsbereichs zu komprimieren. Form und Aussehen dieser komprimierten Zone oberhalb der Ankerplatte, wie sie sich einstellt, wenn das Hereindrücken des Eises in den durch den Schacht entstandenen Freiraum (Bild 5.4) bei Zugbelastung in ungestörtem Zustand verhindert ist, ist Bild 5.6 zu entnehmen.

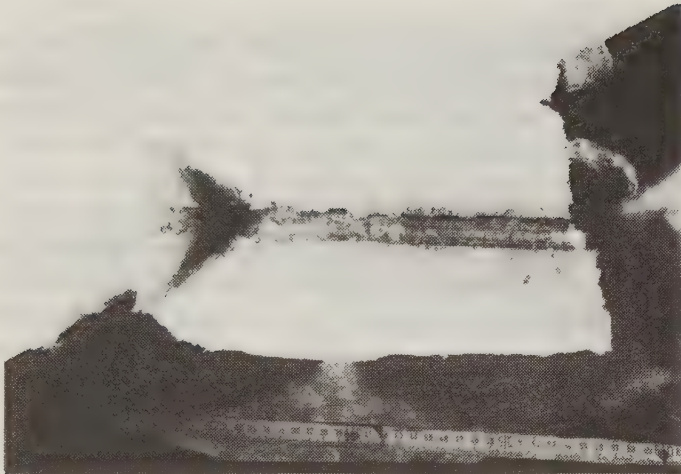


Bild 5.6: Herausgezogener Eisolombenrest mit der kegelförmigen komprimierten Zone

Dieser Eiskegel mit der Ankerplatte stanzt sich durch die Eisplombe durch, wobei die maßgebliche Scherfläche die ca. 50° geneigte Mantelfläche dieses Kegels ist. Daraus ergibt sich die zugehörige Scherspannung τ als die für die Tragfähigkeit des Eisplombenankers maßgebliche Spannung. Die zum Versagen führende Scherspannung sei τ_f . Auf die Zone oberhalb der Ankerplatte wirkt dabei die Druckspannung σ .

Wenn Ankerplatte und Eiskegel ca. 60 % der Eisplombe durchstanzt haben, bricht der Anker ruckartig.

Die Verformung bzw. Spannungsverteilung des umgebenden Schelfeises wurde hier nicht untersucht.

5.3 Langzeitversuche

Wichtigster Aspekt bei der Prüfung eines Ankers ist die Untersuchung seiner Standfestigkeit. Bei Ankern in Eis und Schnee ist die Tatsache, daß sie sich ständig verformen, durch keine konstruktive Maßnahme zu verhindern. Zur Prüfung des neuen Eisplombenankers wurden also Langzeitversuche unternommen, die bis zu 25 Stunden Belastungsdauer hatten, um innerhalb dieser Periode festzustellen, welche Verformungen und Verformungsgeschwindigkeiten sich ergeben, welchem Grenzwert sich die Verformungsgeschwindigkeiten nähern bzw. ob sich Verformungsgeschwindigkeiten einstellen, die zum Bruch oder zum Versagen des Ankers führen. Längerfristige Versuche waren wegen der begrenzten Aufenthaltsdauer nicht möglich.

Nachdem bei Langzeitversuchen mit einer konstanten Belastung von ca. 20 kN die Verformungsgeschwindigkeiten nach einer Verformung von ca. 3 cm fast gegen Null gingen (Bilder 5.7 und 5.8), wurden 2 Versuche mit ca. 31 kN bei unterschiedlicher Dimensionierung der Anker durchgeführt. Bild 5.9 zeigt die Kriechkurve des Ankers L4 mit einer Ankerlänge $l_A = 1,55$ m, bei dem die Verformungsgeschwindigkeit sich allmählich beschleunigt, so daß trotz einer absolut gesehen geringen Verformungsgeschwindigkeit bereits das tertiäre Kriechen, also das Versagen, begonnen hat. Daraus folgt, daß zur Aufnahme von 31 kN über eine längere Nutzungsdauer ein Anker mit einer Ankerlänge $l_A = 1,55$ m nicht ausreicht.

So wurde untersucht, ob eine Vergrößerung der Ankerlänge zu größerer Tragfähigkeit führt. Bild 5.10 zeigt die Kriechkurve des Ankers L5 mit einer Ankerlänge $l_A = 3,50$ m. Bei diesem Anker erreicht die Verformungsgeschwindigkeit nach einigen Stunden den Wert $5 \cdot 10^{-5}$ mm/s. Diese Verformungsgeschwindigkeit gewährleistet eine Belastbarkeit mit ca. 31 kN über einen wesentlich längeren Zeitraum.

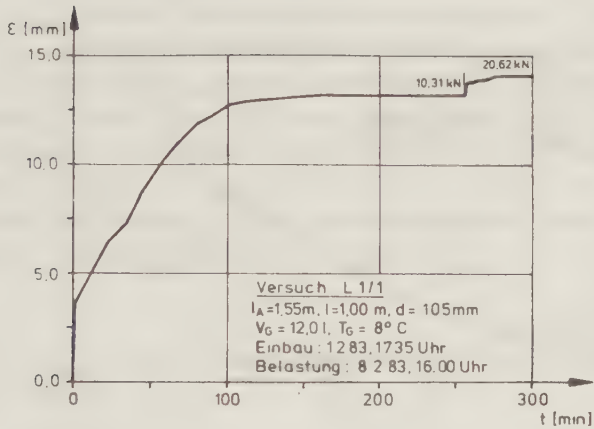


Bild 5.7: Kriechkurve Anker L1/1

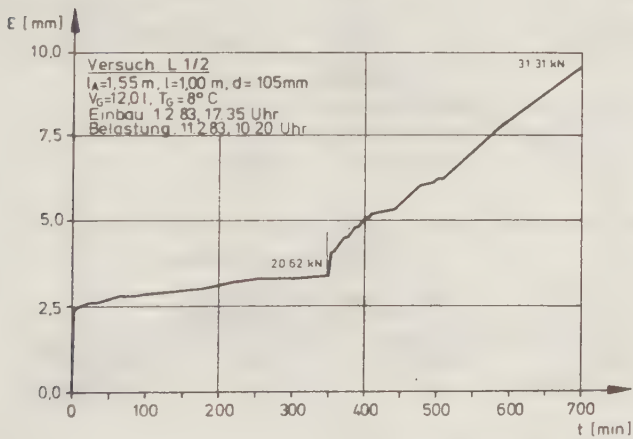


Bild 5.8: Kriechkurve Anker L1/2

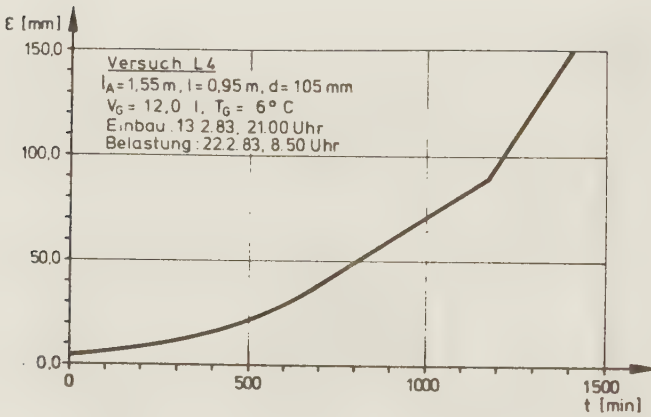


Bild 5.9: Kriechkurve Anker L4

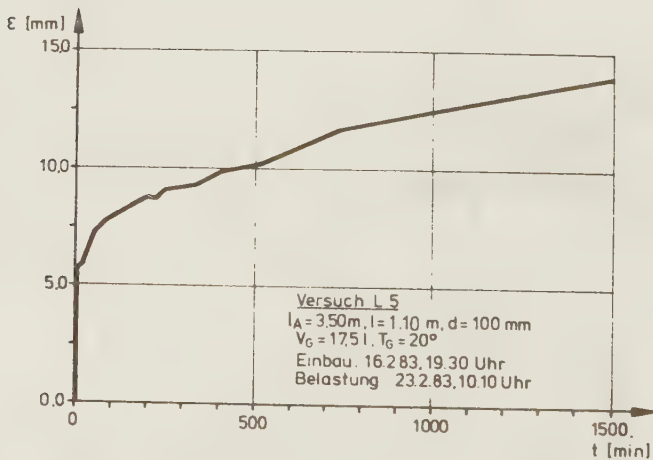


Bild 5.10: Kriechkurve Anker L5

Trägt man nun - analog zum Verfahren von Ladanyi 1972 /40/,
der Ergebnisse von Kriechversuchen in Permafrostböden in Ab-

hängigkeit von der Druckspannung σ darstellte - die Kriechkurven auf, die bei unterschiedlicher Belastung $\tau_a < \tau_b < \tau_c < \tau_d < \tau_e$ jeweils an identischen Ankern gemessen wurden, erhält man den IV. Quadranten $\epsilon = f(t)$ in Bild 5.11. Schneidet man diese Kriechkurven mit Linien konstanter Zeit t^i und projiziert die Schnittpunkte in den I. Quadranten, erhält man eine Schar isochroner Spannungs-Verformungs-Kurven $\epsilon = f(\tau)$, von denen jede einzelne den Verformungszustand nach einer bestimmten Belastungsdauer t^i darstellt.

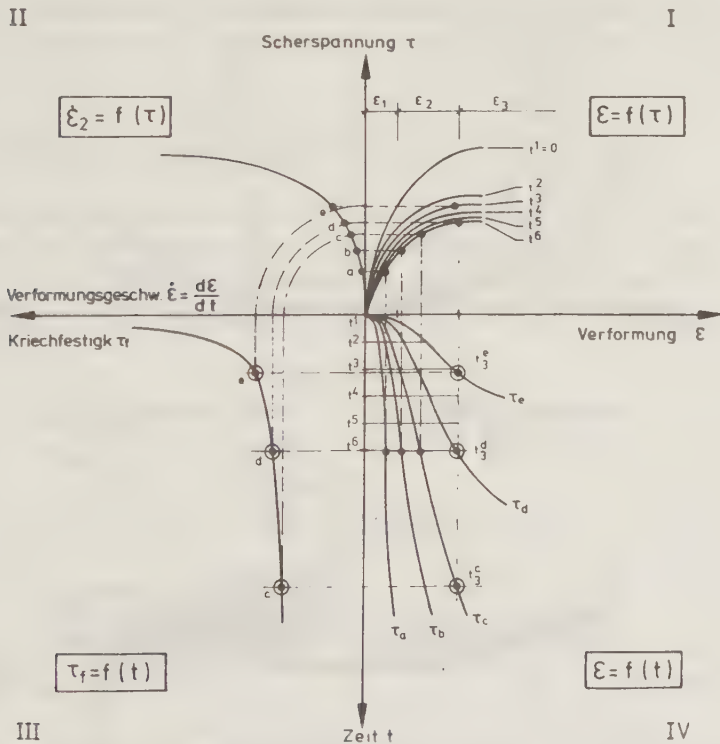


Bild 5.11: Prinzipielle Darstellung der Ergebnisse von Ankerzugversuchen mit Eisplombenankern bei verschiedenen Belastungen in Anlehnung an Ladanyi 1972 /40/

Ergänzt man die Darstellung durch die Verformungsgeschwindigkeit $\dot{\epsilon}_2 = \frac{d\epsilon}{dt}$ als Funktion der jeweiligen Scherspannung τ (Quadrant II), ergibt sich die signifikante rheologische Kurve $\dot{\epsilon}_2 = f(\tau)$ des sekundären Kriechens für die jeweiligen Versuchsbedingungen, die für höhere Scherspannungen nicht-linear

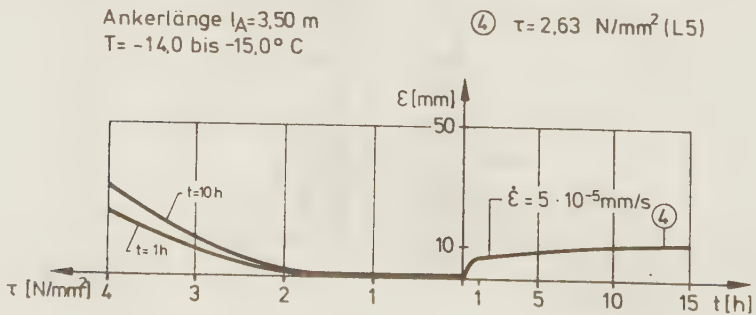
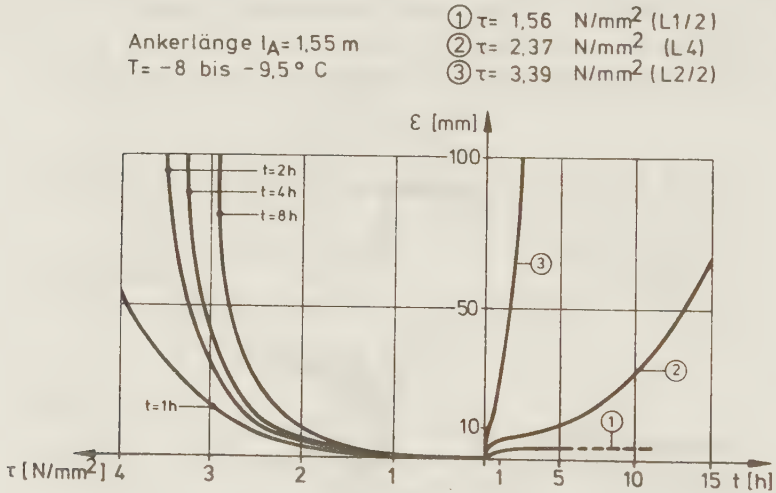


Bild 5.12: Isochrone τ - ϵ -Kurven und korrespondierende Kriechkurven bei konstanter Scherspannung und unterschiedlichen Ankerlängen

ist. Den III. Quadranten $\tau_f = f(t)$ erhält man schließlich, indem man den Beginn t_3^i des tertiären Kriechens ϵ_3^i , der ja den Beginn des Versagens kennzeichnet, als Funktion der zugehörigen Versagensspannung aufträgt. Diese Kurve beschreibt dann die zeitabhängige Kriechfestigkeit τ_f .

Stellt man die Kriechkurven der Langzeitversuche jeweils für eine (konstante) Scherspannung und eine Ankerlänge (damit Eis-temperatur) dar ($\epsilon = f(t)$), lassen sich die jeweiligen zugehörigen Verformungszustände nach einer bestimmten Belastungsdauer (hier: 1, 2, 4, 8 und 10 Stunden) in Abhängigkeit von der Scherspannung τ ermitteln ($\epsilon = f(\tau)$, s. Bild 5.12).

5.4 Versuch zum Verhalten unter dynamischer Belastung

Bei dynamischer Belastung, die probeweise durch Belasten, Entlasten und Wiederbelasten innerhalb kürzester Zeit simuliert wurde (Versuch D1), ergaben sich erwartungsgemäß (s. 2.5) wesentlich geringere Verformungen und Verformungsge-

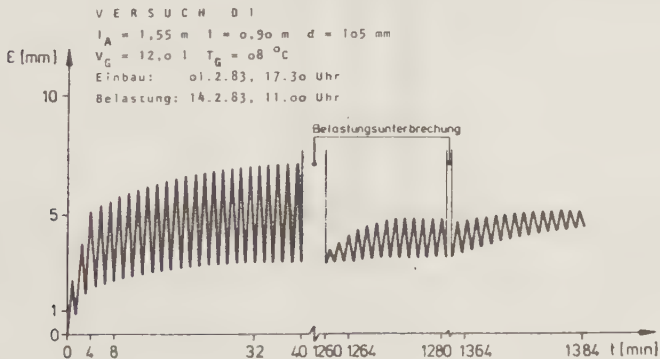


Bild 5.13: Kriechkurve Versuch D1 (Belastung mit 44,77 kN)

schwindigkeiten als bei den Versuchen mit konstanter Belastung (Bild 5.13).

5.5 Versuche zur Konstruktion des Eisplombenankers

5.5.1 Überblick

Um Aussagen über die Bedeutung konstruktiver Größen für das Verformungsverhalten des Eisplombenankers machen zu können, wurde in den Versuchsreihen 2 bis 8 der jeweilige Einfluß folgender Parameter auf die Tragfähigkeit bzw. das Verformungsverhalten untersucht (Bild 5.14):

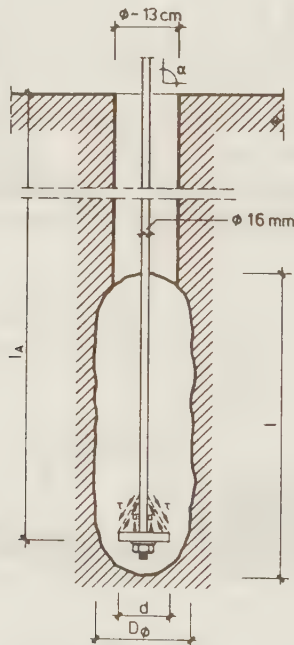


Bild 5.14: Eisplombenanker

1. Einbindetiefe bzw. Ankerlänge l_A
2. Verankerungslänge l
3. Ankerplattendurchmesser d
4. Durchmesser der Eisplombe D
5. Neigung des Ankers α

5.5.2 Verankerungslänge und Eisplombendurchmesser

Stellt man Bohrlöcher gleichen Durchmessers her, können Variationen des Eisplombendurchmessers nur über die einzufüllende Mischung aus Celluloseäther und Wasser erfolgen, wobei das Volumen der Eisplombe über das Volumen V_G des Gemisches, der Durchmesser der Eisplombe aber über die Einfülltemperatur T_G zu beeinflussen ist. Ausgangspunkt dieser Überlegungen war die Tatsache, daß beim Abkühlen des Gemisches im Bohrloch umso mehr Wärmemenge frei wird, die Umgebungseis schmelzen könnte, je wärmer das eingefüllte Gemisch ist. Die entstandene Verankerungslänge l ist nach dem Erstarren der Eisplombe von der Oberfläche aus zu bestimmen, bei näherungsweise Annahme einer zylinderförmigen Eisplombe ergibt sich unter Berücksichtigung einer 10 %-igen Volumenvergrößerung beim Erstarren des Gemisches dann ein durchschnittlicher Durchmesser D_0 der Eisplombe zu

$$D_0 = 1,18 \sqrt{\frac{V_G}{l}} \quad (4)$$

Durchmesser und damit Verankerungslänge hängen nicht nur von der Einfülltemperatur des Gemisches, sondern in hohem Maße auch von der Beschaffenheit und der Schichtung des Schelfeises ab. Bild 5.15 zeigt 2 Eisplombenkörper, die ohne vorherige Belastung ausgegraben wurden. Die Dimensionen dieser Eisplomben bestätigten die oben getroffenen Annahmen.



Bild 5.15: Ausgegrabene unbelastete Eisplombenanker

links: $V_G = 12 \text{ l}$, $T_G = 23^\circ\text{C}$

rechts: $V_G = 9 \text{ l}$, $T_G = 1^\circ\text{C}$

Beim Einfüllen von 12 l Gemisch bei 23°C entsteht z.B. eine Eisplombe mit $D_\emptyset = 28$ bis 30 cm und $l = 36$ bis 45 cm, bei 9 l und 1°C sind $D_\emptyset = 13$ bis 17 cm und $l = 60$ bis 70 cm. Bei der rechten Eisplombe in Bild 5.15 zeigt sich der Einfluß der Schichtung des Schelfeises auf den entstehenden Eiskörper, der sich hier ausgeprägt in einer weichen Schneeschicht ausgebuchtet hat, wie es Bild 5.16 an anderen Beispielen zeigt.

Da solche Einflüsse von Schichtung und Beschaffenheit des Schelfeises auf den entstehenden Eisplombenkörper nur durch Probebohrungen einigermaßen exakt vorausgesagt werden können, ist eine Vorausbestimmung der Dimensionierung der Eisplombe vor dem Einfüllen der Mischung problematisch. Demzufolge wurden in einer Versuchsreihe bei ungefähr gleicher Einfülltemperatur T_G und bei konstanter Ankerlänge l_A das Volumen V_G

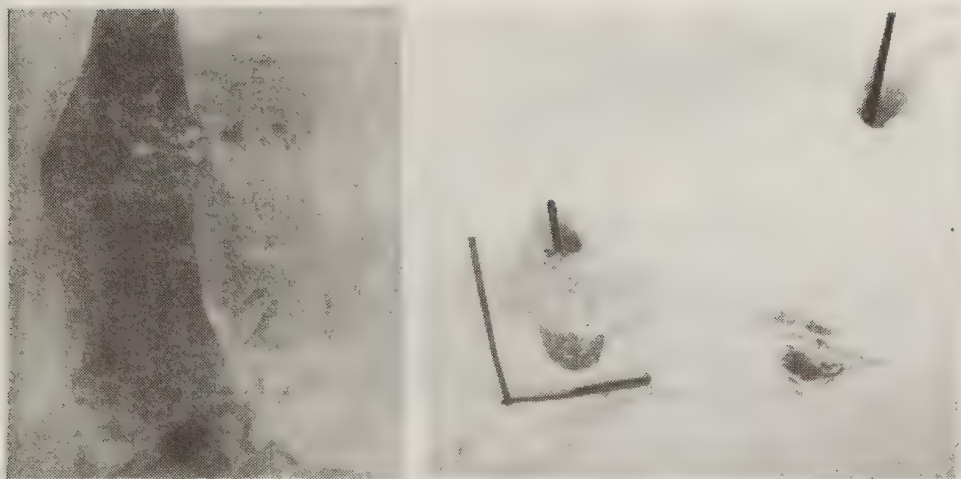


Bild 5.16: Ausbuchtung des entstehenden Eiskörpers in einer weichen Schneeschicht

der Einfüllmischung variiert (Versuchsreihe 4), in zwei weiteren bei gleichem V_G die Einfülltemperaturen (Versuchsreihen 2 und 8). Tabelle 5.1 zeigt die Parameter der einzelnen Versuche, wobei die Reihe 4 bei ungefähr gleicher Einfülltemperatur auch ungefähr die gleichen Eisplombendurchmesser D_p (≈ 14 cm) aufweist (Ausnahme: Versuch 4.5), aufgrund der unterschiedlichen Gemischvolumina V_G aber entsprechend unterschiedliche Verankerungslängen l . Im Gegensatz dazu variiert bei den Reihen 2 und 8 der Eisplombendurchmesser aufgrund der unterschiedlichen Einfülltemperaturen von 13 bis 23 cm, je nach eingefülltem Volumen stellen sich entsprechende Werte bei der Verankerungslänge ein. Bild 5.17 zeigt die Verformungskurven der Versuchsreihe 4, bei der nur der Versuch 4.1 wegen seiner zu geringen Verankerungslänge von 55 cm gegenüber den anderen Versuchen hinsichtlich seines Verformungsverhaltens etwas aus dem Rahmen fällt, während sich im Übrigen

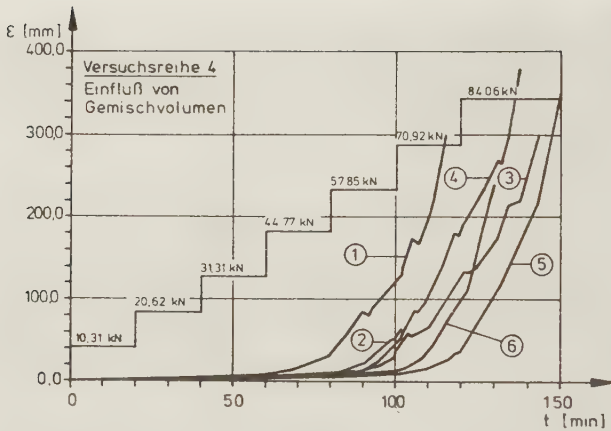


Bild 5.17: Kriechkurven der Versuchssreihe 4

$$l_A = 1,55 \text{ m; } d = 105 \text{ mm; } T_G = 3 - 9 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$1 \quad V_G = 7,5 \text{ l; } l = 0,55 \text{ m; } D_{\phi} = 13,8 \text{ cm}$$

$$2 \quad V_G = 10,0 \text{ l; } l = 0,75 \text{ m; } D_{\phi} = 13,7 \text{ cm}$$

$$3 \quad V_G = 12,5 \text{ l; } l = 0,80 \text{ m; } D_{\phi} = 14,8 \text{ cm}$$

$$4 \quad V_G = 15,0 \text{ l; } l = 1,05 \text{ m; } D_{\phi} = 14,1 \text{ cm}$$

$$5 \quad V_G = 17,5 \text{ l; } l = 0,85 \text{ m; } D_{\phi} = 17,0 \text{ cm}$$

$$6 \quad V_G = 20,0 \text{ l; } l = 1,40 \text{ m; } D_{\phi} = 14,1 \text{ cm}$$

eine Verbesserung von Belastbarkeit und Verformungsgeschwindigkeit mit größer werdender Verankerungslänge erkennen läßt.

Der Versuch 2.1 zeigt ein augenfälliges Verformungsverhalten (s. Bild 5.18), da der Anker bei 44,77 kN plötzlich um ca. 8 cm ruckt und nach Umbau der Spannprese wieder mit der gleichen Verformungsgeschwindigkeit kriecht wie vor dem Ruck. Dies beruht auf einer unvollkommenen Ausbildung der Eisplombe, was durch den rechnerisch ermittelten mittleren Eisplombendurchmesser von 12,7 cm bestätigt wird.

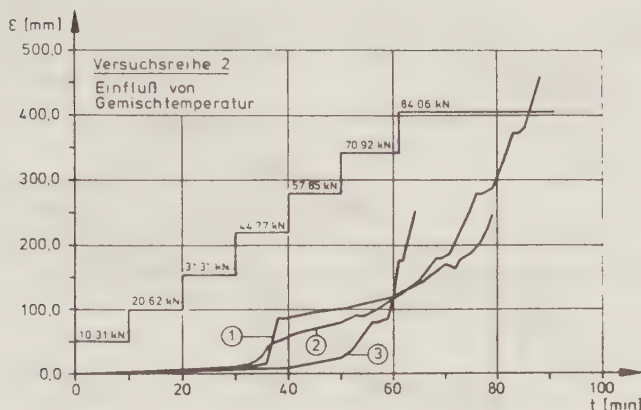


Bild 5.18: Kriechkurven der Versuchssreihe 2

$$l_A = 1,55 \text{ m}; d = 105 \text{ mm}; V_G = 12,0 \text{ l}$$

$$1 \quad T_G = 8 \text{ }^{\circ}\text{C}; l = 0,95 \text{ m}; D_{\phi} = 13,3 \text{ cm}$$

$$2 \quad T_G = 21 \text{ }^{\circ}\text{C}; l = 0,75 \text{ m}; D_{\phi} = 15,0 \text{ cm}$$

$$3 \quad T_G = 35 \text{ }^{\circ}\text{C}; l = 0,35 \text{ m}; D_{\phi} = 21,9 \text{ cm}$$

Auch die Dimensionierung des Ankers 2.3 ist nicht sinnvoll, da sich aufgrund der hohen Einfülltemperatur ein Eisplombendurchmesser von 21,9 cm einstellt, wodurch die Verankerungslänge nur 35 cm betragen kann (Tabelle 5.1).

Bei Versuchssreihe 8 (Bild 5.19) wurde die gleiche Zielsetzung verfolgt wie in der Versuchssreihe 2, diesmal sollte aber durch Vergrößerung des eingefüllten Gemisch-Volumens verhindert werden, daß sich zu geringe Verankerungslängen einstellen. Allerdings ist die sich bei Anker 8.1 ergebende Verankerungslänge von 45 cm auch noch zu gering.

Fazit dieser Versuchsserien war also, daß bei hohen Einfülltemperaturen ein großer Durchmesser der Eisplombe und eine

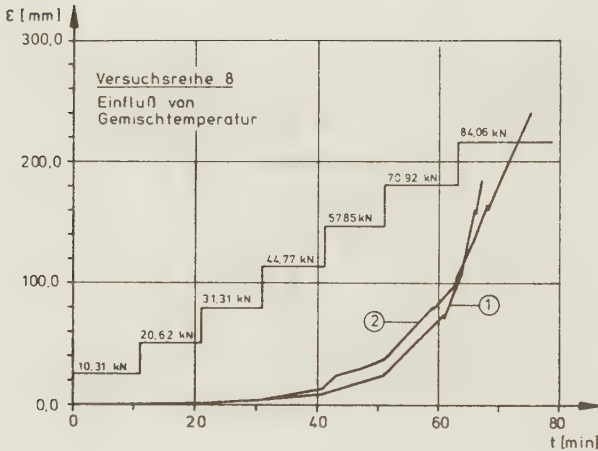


Bild 5.19: Kriechkurven der Versuchssreihe 8

$$1_A = 1,55 \text{ m; } d = 105 \text{ mm; } V_G = 17,5 \text{ l}$$

$$1 \quad T_G = 26 \text{ }^{\circ}\text{C; } l = 0,45 \text{ m; } D_{\phi} = 23,3 \text{ cm}$$

$$2 \quad T_G = 16 \text{ }^{\circ}\text{C; } l = 0,70 \text{ m; } D_{\phi} = 18,7 \text{ cm}$$

entsprechend geringere Verankerungslänge entstehen. Je größer dabei die Verankerungslänge l ist, desto später beginnt das tertiäre Kriechstadium des Ankers, d.h. desto bessere Werte hinsichtlich Verformungsgeschwindigkeit und Belastbarkeit lassen sich erzielen.

5.5.3 Ankerlänge

Mit zunehmender Ankerlänge nimmt die Temperatur des Schelfeises ab (Bild 2.4) und damit die Festigkeit des Eises zu (vgl. 2.3). Aufgrund der sehr geringen Dichte des Schelfeises bis zu einer Tiefe von 1 m ist im Sinne einer sicheren und langfristigen Verankerung darauf zu achten, daß ein Anker

möglichst mindestens eine Ankerlänge von ca. 1,00 m hat (s. 2.2). Bild 5.2o zeigt die Verformungskurven der Versuchsreihe 5, bei der die Ankerlängen von 1,50 bis 3,00 m variiert wurden (Tabelle 5.1).

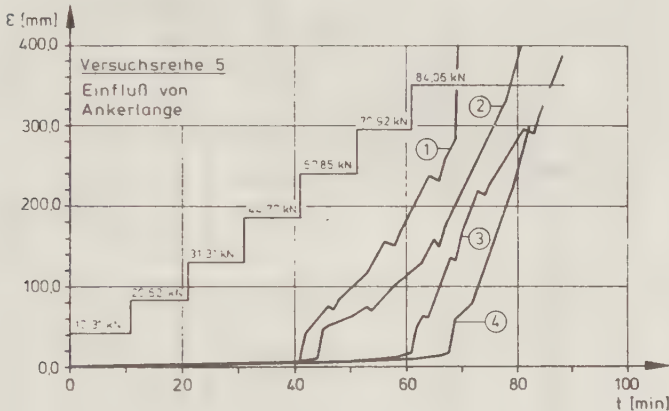


Bild 5.2o: Kriechkurven der Versuchsreihe 5

$d = 105 \text{ mm}$; $V_G = 12,0 \text{ l}$; $T_G = 6 - 7 \text{ }^{\circ}\text{C}$

- | | |
|---|--|
| 1 | $l_A = 1,50 \text{ m}$; $l = 1,00 \text{ m}$; $D_{\phi} = 13,0 \text{ cm}$ |
| 2 | $l_A = 2,00 \text{ m}$; $l = 1,00 \text{ m}$; $D_{\phi} = 13,0 \text{ cm}$ |
| 3 | $l_A = 2,50 \text{ m}$; $l = 0,80 \text{ m}$; $D_{\phi} = 14,5 \text{ cm}$ |
| 4 | $l_A = 3,00 \text{ m}$; $l = 0,90 \text{ m}$; $D_{\phi} = 13,7 \text{ cm}$ |

Man sieht, daß sich das tertiäre Kriechen um so später einstellt, je größer die Ankerlänge l_A und damit je niedriger die Eistemperatur ist.

Dies bestätigt sich in Versuchsreihe 3 (Bild 5.21), bei der mit einer Ankerplatte $d = 42 \text{ mm}$ die Ankerlängen von 1,00 bis 3,50 m verändert wurden.

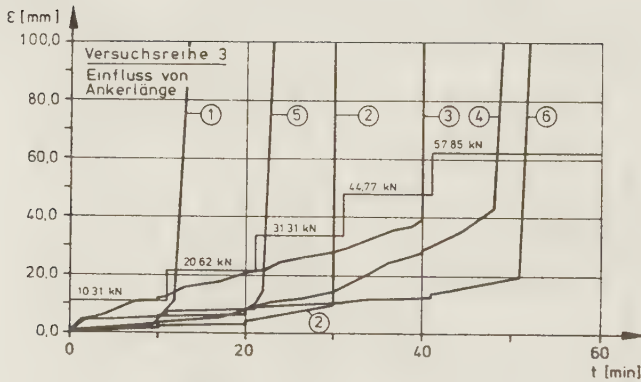


Bild 5.21: Kriechkurven der Versuchssreihe 3

$d = 42 \text{ mm}$; $V_G = 12,0 \text{ l}$; $T_G = 8^\circ \text{C}$

- | | |
|---|---|
| 1 | $l_A = 1,00 \text{ m}$; $l = 0,65 \text{ m}$; $D_\emptyset = 15,4 \text{ cm}$ |
| 2 | $l_A = 1,50 \text{ m}$; $l = 0,75 \text{ m}$; $D_\emptyset = 15,0 \text{ cm}$ |
| 3 | $l_A = 2,00 \text{ m}$; $l = 0,90 \text{ m}$; $D_\emptyset = 13,7 \text{ cm}$ |
| 4 | $l_A = 2,50 \text{ m}$; $l = 1,60 \text{ m}$; $D_\emptyset = 10,2 \text{ cm}$ |
| 5 | $l_A = 3,00 \text{ m}$; $l = 0,90 \text{ m}$; $D_\emptyset = 13,7 \text{ cm}$ |
| 6 | $l_A = 3,50 \text{ m}$; $l = 2,20 \text{ m}$; $D_\emptyset = 8,7 \text{ cm}$ |

Bei Versuchssreihe 3 wurde deutlich, daß bei einem Bohrlochdurchmesser von ca. 13 cm Ankerlängen von 2,5 m und mehr Probleme für die Ausbildung einer geschlossenen Eisplombe verursachen, wie es bei den Ankern 3.4 und 3.6 geschehen ist, die Eisplombendurchmesser von 10,2 bzw. 8,7 cm aufweisen (Tabelle 5.1). Das hat zur Folge, daß im Verlaufe der Verankerungslänge von 1,60 bzw. 2,20 m Stellen sehr dünner oder nicht existierender Eisplombe vorkommen. Dies ist einerseits auf die hohe Viskosität des Gemisches, andererseits auf das drucklose Einfüllen zurückzuführen.

Tabelle 5.4: Gemessene Verformungsgeschwindigkeiten $\dot{\epsilon}_2$ der einzelnen Versuche in Abhängigkeit von der auf-gebrachten Belastung

Versuch	Belastung	Druck- spannung σ kN	Scher- spannung τ N/mm ²	Verformungs- geschwindigk. $\dot{\epsilon}_2$ mm/s	Versuch	Belastung	Druck- spannung σ kN	Scher- spannung τ N/mm ²	Verformungs- geschwindigk. $\dot{\epsilon}_2$ mm/s
L1/1	20,62	2,44	1,56	$3,3 \times 10^{-5}$	4.6	31,31	3,70	2,37	$7,5 \times 10^{-4}$
L1/2	20,62	2,44	1,56	$1,7 \times 10^{-5}$		44,77	5,29	3,39	$2,4 \times 10^{-3}$
	31,31	3,70	2,37	$2,8 \times 10^{-4}$		57,85	6,84	4,40	$4,7 \times 10^{-4}$
L2/2	44,77	5,29	3,39	$1,4 \times 10^{-2}$	5.1	20,62	2,44	1,56	$3,7 \times 10^{-3}$
L4	31,31	3,70	2,37	$3,2 \times 10^{-3}$		31,31	3,70	2,37	$1,9 \times 10^{-3}$
L5	31,31	4,09	2,63	$5,0 \times 10^{-5}$		44,77	5,29	3,39	$7,6 \times 10^{-3}$
L6	31,31	3,70	2,37	$2,7 \times 10^{-3}$		57,85	6,84	4,40	$1,0 \times 10^{-1}$
						70,92	8,38	5,39	$2,4 \times 10^{-1}$
2.1	20,62	2,44	1,56	$1,0 \times 10^{-3}$	5.2	20,62	2,44	1,56	$9,3 \times 10^{-3}$
	31,31	3,70	2,37	$6,3 \times 10^{-2}$		31,31	3,70	2,37	$1,4 \times 10^{-3}$
	44,77	5,29	3,39	$1,5 \times 10^{-2}$		44,77	5,29	3,39	$5,2 \times 10^{-2}$
	57,85	6,84	4,40	$3,2 \times 10^{-2}$		57,85	6,84	4,40	$5,0 \times 10^{-1}$
						70,92	8,38	5,39	$1,1 \times 10^{-1}$
2.2	20,62	2,44	1,56	$2,8 \times 10^{-3}$		84,06	9,94	6,39	$2,5 \times 10^{-1}$
	31,31	3,70	2,37	$8,7 \times 10^{-3}$		97,58	11,54	7,42	$4,8 \times 10^{-1}$
	44,77	5,29	3,39	-	5.3	20,62	2,44	1,56	$3,7 \times 10^{-4}$
	57,85	6,84	4,40	$3,2 \times 10^{-2}$		31,31	3,70	2,37	$6,3 \times 10^{-4}$
2.3	20,62	2,44	1,56	$1,7 \times 10^{-3}$		44,77	5,29	3,39	$1,3 \times 10^{-3}$
	31,31	3,70	2,37	$2,8 \times 10^{-3}$		57,85	6,84	4,40	$3,5 \times 10^{-3}$
	44,77	5,29	3,39	$5,6 \times 10^{-2}$		84,06	9,94	6,39	$1,4 \times 10^{-2}$
	57,85	6,84	4,40	$1,8 \times 10^{-2}$		97,58	11,54	7,42	$2,0 \times 10^{-1}$
3.1	20,62	17,42	11,19	$5,8 \times 10^{-2}$	5.4	20,62	2,44	1,56	-
3.2	20,62	17,42	11,19	$1,6 \times 10^{-3}$		31,31	3,70	2,37	$8,3 \times 10^{-3}$
	31,31	26,44	16,99	$9,4 \times 10^{-3}$		44,77	5,29	3,39	$1,0 \times 10^{-3}$
3.3	20,62	17,42	11,19	$1,0 \times 10^{-2}$		57,85	6,84	4,40	$1,1 \times 10^{-3}$
	31,31	26,44	16,99	$1,2 \times 10^{-2}$		70,92	8,38	5,39	$2,8 \times 10^{-2}$
	44,77	37,81	24,30	$1,7 \times 10^{-2}$		84,06	9,94	6,39	$1,6 \times 10^{-1}$
						97,58	11,54	7,42	$3,4 \times 10^{-1}$
3.4	20,62	17,42	11,19	$3,9 \times 10^{-3}$	6.1	20,62	2,44	1,56	$5,6 \times 10^{-4}$
	31,31	26,44	16,99	$9,1 \times 10^{-3}$		31,31	3,70	2,37	$9,3 \times 10^{-3}$
	44,77	37,81	24,30	$2,3 \times 10^{-2}$		44,77	5,29	3,39	$2,0 \times 10^{-3}$
	57,85	48,86	31,40	$2,7 \times 10^{-2}$		57,85	6,84	4,40	$5,9 \times 10^{-2}$
3.5	20,62	17,42	11,19	$5,6 \times 10^{-4}$		70,92	8,38	5,39	$1,7 \times 10^{-1}$
	31,31	26,44	16,99	$5,3 \times 10^{-2}$		84,06	9,94	6,39	$4,2 \times 10^{-1}$
3.6	20,62	17,42	11,19	$1,5 \times 10^{-3}$	6.2	20,62	2,44	1,56	$6,1 \times 10^{-4}$
	31,31	26,44	16,99	$1,5 \times 10^{-3}$		31,31	3,70	2,37	$1,6 \times 10^{-3}$
	44,77	37,81	24,30	$2,0 \times 10^{-3}$		44,77	5,29	3,39	$6,3 \times 10^{-3}$
	57,85	48,86	31,40	$8,9 \times 10^{-3}$		57,85	6,84	4,40	$6,1 \times 10^{-1}$
						70,92	8,38	5,39	$1,5 \times 10^{-1}$
4.1	20,62	2,44	1,56	$1,9 \times 10^{-3}$		84,06	9,94	6,39	$2,7 \times 10^{-1}$
	31,31	3,70	2,37	$3,2 \times 10^{-3}$	7.1	20,62	6,01	3,86	$5,2 \times 10^{-3}$
	44,77	5,29	3,39	$8,7 \times 10^{-3}$		31,31	9,13	5,87	$3,5 \times 10^{-3}$
4.2	20,62	2,44	1,56	$1,2 \times 10^{-3}$		44,77	13,05	8,39	$5,5 \times 10^{-2}$
	31,31	3,70	2,37	$1,3 \times 10^{-3}$		57,85	16,86	10,84	$2,0 \times 10^{-2}$
	44,77	5,29	3,39	$2,9 \times 10^{-4}$	7.2	20,62	2,19	1,81	$4,2 \times 10^{-3}$
4.3	31,31	3,70	2,37	$9,3 \times 10^{-3}$		31,31	3,33	2,74	$2,5 \times 10^{-3}$
	44,77	5,29	3,39	$1,9 \times 10^{-3}$		44,77	4,76	3,92	$3,0 \times 10^{-2}$
	57,85	6,84	4,40	$7,4 \times 10^{-3}$		57,85	6,15	5,06	$1,2 \times 10^{-2}$
4.4	20,62	2,44	1,56	$1,2 \times 10^{-3}$	8.1	20,62	2,44	1,56	$8,3 \times 10^{-4}$
	31,31	3,70	2,37	$1,8 \times 10^{-3}$		31,31	3,70	2,37	$2,0 \times 10^{-3}$
	44,77	5,29	3,39	$2,1 \times 10^{-3}$		44,77	5,29	3,39	$6,9 \times 10^{-2}$
	57,85	6,84	4,40	$8,1 \times 10^{-4}$		57,85	6,84	4,40	$2,6 \times 10^{-2}$
4.5	20,62	2,44	1,56	$3,5 \times 10^{-4}$		70,92	8,38	5,39	$8,5 \times 10^{-1}$
	31,31	3,70	2,37	$5,7 \times 10^{-3}$	8.2	20,62	2,44	1,56	$5,6 \times 10^{-3}$
	44,77	5,29	3,39	$1,1 \times 10^{-3}$		31,31	3,70	2,37	$2,9 \times 10^{-3}$
	57,85	6,84	4,40	$2,9 \times 10^{-3}$		44,77	5,29	3,39	$1,4 \times 10^{-2}$
	70,92	8,38	5,39	$8,5 \times 10^{-3}$		57,85	6,84	4,40	$2,2 \times 10^{-2}$
4.6	20,62	2,44	1,56	$4,0 \times 10^{-4}$		84,06	8,38	5,39	$8,7 \times 10^{-1}$
							9,94	6,39	$2,0 \times 10^{-1}$

5.5.4 Ankerplattendurchmesser

Wie Tabelle 5.1 zeigt, wurden verschiedene Ankerplattengrößen getestet. Es stellte sich heraus, daß bei sonst gleichen Bedingungen größere Ankerplatten nicht zu einer linear geringeren Verformungsgeschwindigkeit führten, sondern etwas schlechtere Werte erzielten als eigentlich erwartet wurde (Tabelle 5.4 und Bilder 5.17 bis 5.21). Dieses Phänomen hatte sich bereits 1962 bei ähnlichen Versuchen mit eingegrabenen Ankern von Kovacs in Grönland gezeigt (s. 3.2.2).

5.5.5 Ankerneigung

Form und Größe der Eisplombe beeinflussen das Tragverhalten des Eisplombenankers. In einer weiteren Versuchsreihe (6) er-

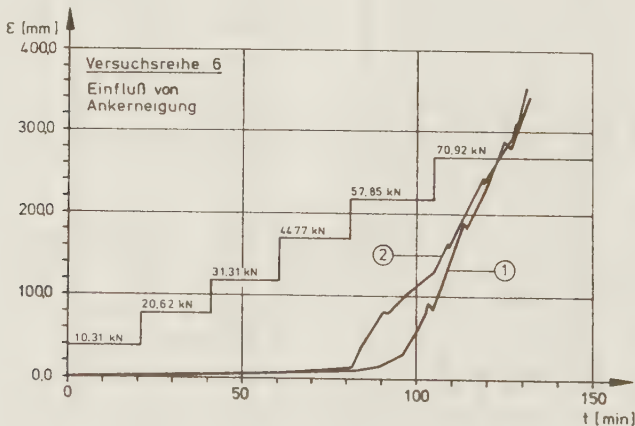


Bild 5.22: Kriechkurven der Versuchsreihe 6

$l_A = 1,55 \text{ m}$; $d = 105 \text{ mm}$; $l = 1,05 \text{ m}$; $V_G = 15,0 \text{ l}$;

$D_\phi = 14,1 \text{ cm}$

1 $\alpha = 80^\circ$

2 $\alpha = 50^\circ$

gab sich, daß aber die Neigung des Bohrlochs auf die entstehende Eisplombe und damit die Neigung des Ankers zumindest im Bereich bis 45° auf die Tragfähigkeit des Ankers keinen Einfluß hat (vgl. Bilder 5.17 bis 5.22).

Weitere geplante Versuche mit Ankerneigungen $> 45^{\circ}$ konnten aus logistischen Gründen nicht durchgeführt werden.

6. Berechnung der Tragfähigkeit des Eisplombenankers

6.1 Ausgangspunkt der Berechnung

Bei Erdankern werden zur Bestimmung der zulässigen Ankerkraft Zugversuche vorgenommen, durch die bei Ankern für vorübergehende Zwecke nach DIN 4125, Teil 1, eine Grenzkraft, unter der die Verschiebung des Ankerkopfes noch deutlich abklingt, bei Dauerankern nach DIN 4125, Teil 2, eine Grenzlast, die den Bruch des Ankers erzeugt, und eine Grenzlast, die ein Kriechmaß $k_s = 2,0$ mm erzeugt, ermittelt werden. Bei Ankern in Eis und Schnee kann die Grenze der Belastbarkeit nicht durch eine Bruchlast angegeben werden, da ein Bruch erst dann erfolgt, wenn der Anker durch Erreichen einer zu hohen Verformungsgeschwindigkeit bereits versagt. Die Möglichkeiten, durch Zugversuche eine bestimmte Kraft zu ermitteln, bei der die Verschiebung des Ankers während einer bestimmten Zeit einen bestimmten Wert nicht überschreitet oder bei der ein gewisses Kriechmaß oder eine bestimmte Kriechgeschwindigkeit eingehalten wird, waren die Ausgangspunkte der Überlegungen zur Vorbereitung der Versuche an der Georg-von-Neumayer-Station.

Die vorhandenen /38/ analytischen Verfahren boten ebenfalls keine befriedigende Grundlage für eine Bemessung des Eisplombenankers, da das Verhalten eines Ankers in Fels oder ungefrorenem Boden quantitativ und qualitativ von dem eines Ankers in Eis und Schnee abweicht.

Daher wurden die in 2.4 beschriebenen Verformungsgesetze zur Beschreibung des Verformungsverhaltens des Eisplombenankers herangezogen.

6.2 Verformung als Funktion der Zeit

Formt man o.g. Glg. (2) - $\dot{\epsilon}_2 = k \cdot \sigma^m$ - um, ergibt sich zur

Beschreibung der sekundären Verformungsgeschwindigkeit für den Eisplombenanker

$$\dot{\epsilon}_2 = \dot{\epsilon}_m \cdot \left(\frac{\tau}{\tau_m} \right)^m \quad (5)$$

mit $\dot{\epsilon}_m$ - Konstante (mm/s)
 τ_m - Vergleichsspannung (N/mm²)
 m - Konstante (-)

Trägt man nun die in Tabelle 5.4 aufgeführten Verformungsgeschwindigkeiten $\dot{\epsilon}_2$ in Abhängigkeit von der jeweiligen Scherspannung τ doppeltlogarithmisch für jeweils eine Ankerlänge auf (Bild 6.1), erkennt man, daß diese Glg. (5) das Verformungsverhalten der einzelnen Anker gut beschreibt: Jede Verformungs-Spannungs-Beziehung ist in dieser Darstellungsweise durch eine Gerade anzunähern (vgl. Bild 6.2), wodurch sich für jeden Anker Exponentialgleichungen der Form der Glg. (5) ergeben, deren Werte in Tabelle 6.1 dargestellt sind, wobei selbstverständlich nur Verformungs-Spannungs-Beziehungen eingegangen sind, bei denen sich der Anker noch im Kriechstadium, also noch nicht im Versagen, befanden.

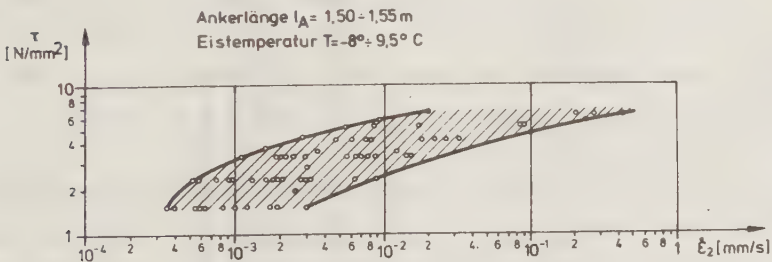


Bild 6.1: Verformungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der jeweiligen Belastung bei $l_A = 1,50$ m

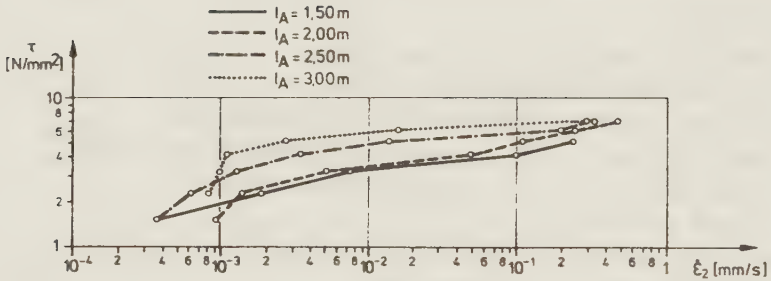


Bild 6.2: Verformungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der jeweiligen Belastung bei verschiedenen Ankerlängen

Tabelle 6.1: Werte von $\dot{\epsilon}_m$, τ_m und m aus Glg. (5) für die einzelnen Versuche

Versuch	$\dot{\epsilon}_m$ mm/s	τ_m N/mm ²	m -
2.1	10^{-3}	1,58	7,56
2.2		1,00	5,31
2.3		1,20	5,13
3.1		-	-
3.2		9,95	9,54
3.3		0,36	1,53
3.4		6,16	5,15
3.5		11,81	24,50
3.6		14,32	6,53
4.1		1,13	4,41
4.2		2,13	5,04
4.3		2,43	7,61
4.4		2,95	11,86
4.5		2,80	7,45
4.6		2,53	7,31
5.1		1,88	11,79
5.2		2,20	11,81
5.3		2,81	15,71
5.4		3,20	16,83
6.1		2,40	7,99
6.2		2,20	13,34
7.1		4,64	7,97
7.2		2,30	7,31
8.1		1,60	8,42
8.2		1,78	9,41

Das Versagen eines Eisplombenankers, gekennzeichnet durch das Einsetzen tertiären Kriechens zum Zeitpunkt t_3 , wird verursacht, wenn der Anker durch eine Scherspannung τ_f belastet wird (Bild 5.11). Die Gesamtverformung bis zu diesem Zeitpunkt t_3 beträgt ϵ_3 , so daß unter Vernachlässigung des primären Kriechens gilt

$$\epsilon_3 = t_3 \dot{\epsilon}_2 = t_3 \dot{\epsilon}_m \left(\frac{\tau_f}{\tau_m} \right)^m \quad (6)$$

Die zeitabhängige Kriechfestigkeit $\tau_f(t)$ ergibt sich dann zu

$$\tau_f = \tau_m \left(\frac{\epsilon_3}{t_3 \dot{\epsilon}_m} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (7)$$

Geht man von einem durchschnittlichen Wert von $\epsilon_3 = 30$ mm für die Verformung bei Beginn des tertiären Kriechens aus, läßt sich die Kriechfestigkeit $\tau_f(t)$ eines jeden Ankers darstellen (Bild 6.3).

Für die Interpretation von Glg. (7) im Zusammenhang mit Tabelle 6.1 gilt bei jeweils gleichem $\dot{\epsilon}_m = 10^{-3}$ mm/s:

1. Je größer τ_m , desto größer τ_f .
2. Je größer m , desto größer τ_f für $t_3 > \frac{\epsilon_3}{\dot{\epsilon}_m}$ und desto kleiner für $t_3 < \frac{\epsilon_3}{\dot{\epsilon}_m}$, d.h. für $\epsilon_3 = 30$ mm: je größer m , desto größer τ_f für $t_3 > 8,33$ Stunden und desto kleiner für $t_3 < 8,33$ h.

Das bedeutet, daß die Vergleichsspannung τ_m für $t' = \frac{\epsilon_3}{\dot{\epsilon}_m}$ einer signifikanten Kriechfestigkeit $\tau_f(t')$ entspricht, die die Ausgangsfestigkeit eines jeden Ankers beschreibt. Von der Größe von m hängt das Abfallen dieser Ausgangsfestigkeit mit der Zeit ab, also in Verbindung mit τ_m die Lebensdauer des Ankers, die hier als Nutzungsdauer definiert ist.

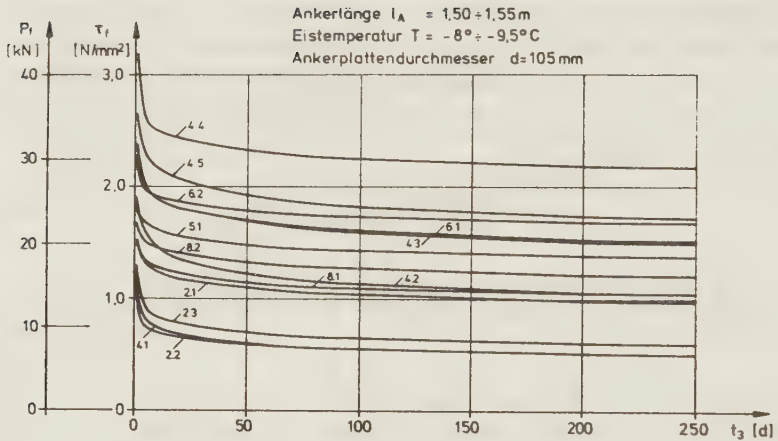


Bild 6.3: Kriechfestigkeit τ_f als Funktion der Zeit bis zum Versagen t_3 bei $l_A \approx 1,50 \text{ m}$

6.3 Verformung in Abhängigkeit von der Ankerkonstruktion

Stellt man die signifikanten Parameter τ_m und m für Belastbarkeit und Lebensdauer jeweils in Abhängigkeit verschiedener konstruktiver Größen dar, läßt sich der Einfluß der jeweiligen Größe auf die Tragfähigkeit des Ankers feststellen. In Bild 6.4 sind τ_m und m bei sonst gleichen Bedingungen als Funktion der Verankerungslänge l aufgetragen. Bei Untersuchung der gemessenen Werte ergibt sich, daß sich bei konstantem m eine lineare Zunahme von τ_m mit wachsendem l darstellen läßt, und zwar in der Form $\tau_m(l) = 2,35 l$, wobei l in Meter und τ_m in N/mm^2 einzusetzen sind.

So ergeben sich für einen Eisplombenanker mit einer Ankerlänge l_A von $1,50$ bis $1,55 \text{ m}$, einem Ankerplattendurchmesser von

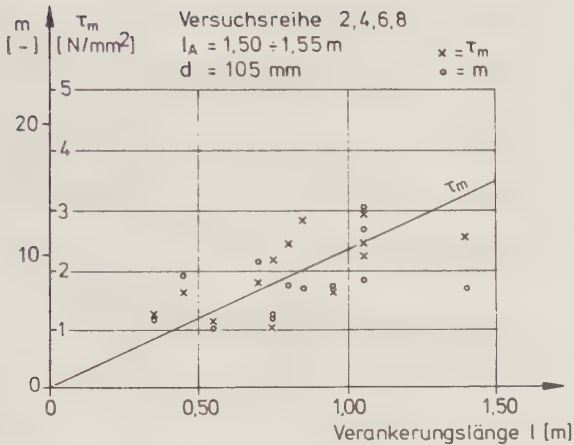


Bild 6.4: τ_m und m in Abhängigkeit von der Verankerungslänge l

$d = 105 \text{ mm}$ und einer Verankerungslänge von $l = 1,00 \text{ m}$ Werte von $\tau_m = 2,35 \text{ N/mm}^2$ und $m = 9,0$.

Bei der Darstellung von τ_m und m als Funktion der Ankerlänge bzw. Eistemperatur (Bild 6.5) ergibt sich eine eindeutige Zunahme von Festigkeit und Lebensdauer des Ankers mit zunehmender Ankerlänge.

In Bild 6.5 sind die Werte der Versuchsreihe 5 dargestellt. Bei der Auswertung von Versuchsreihe 3 bestätigt sich diese Tendenz prinzipiell, jedoch mit größeren Abweichungen wegen der kleineren Ankerplatte.

Formt man Glg. (3), die den Einfluß der Eistemperatur auf das Verformungsverhalten berücksichtigt, um, erhält man mit Glg. (7):

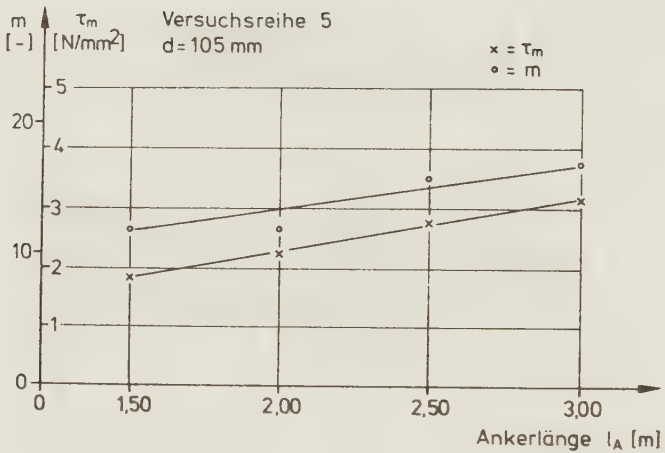


Bild 6.5: τ_m und m in Abhängigkeit von der Ankerlänge l_A

$$\tau_f = 1 \cdot \tau_m \cdot \left(\frac{\epsilon_3}{\epsilon_3 - \epsilon_m} \right)^{\frac{1}{m}} \cdot e^{\frac{Q}{R} \left(\frac{264,5 - T}{264,5} \right)} \quad \text{für } T < 264,5 \text{ K} \quad (8)$$

mit $Q = 83,7 \text{ kJ/mol}$

$R = 8,31 \text{ J/mol/K}$

$\tau_m = 2,35 \text{ N/mm}^2$

$m = 9,0$

T jeweilige absolute Temperatur (K)

Bild 6.6 zeigt die Zunahme der Kriechfestigkeit über die Zeit bei wachsender Ankerlänge, wobei bei einer Ankerlänge von $l_A = 1,50$ bis $1,55 \text{ m}$ die Eistemperatur $T = 264,5 \text{ K}$ ist, die in Glg. (8) als Bezugstemperatur gewählt worden ist.

Man sieht daraus, daß tiefere Anker eine bestimmte Belastung längere Zeit tragen können bzw. bei vorgegebener Lebensdauer eine höhere Belastung; dies ergibt sich aus der mit wachsender Ankerlänge niedriger werdenden Temperatur und damit

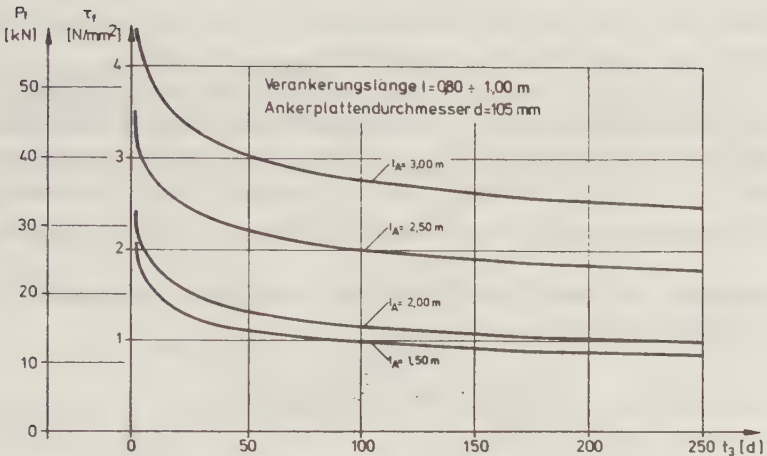


Bild 6.6: Kriechfestigkeit τ_f als Funktion der Zeit bis zum Versagen t_3 bei verschiedenen Ankerlängen

steigenden Festigkeit des Eises ohne Berücksichtigung der Konsistenzänderung des Umgebungseises.

6.4 Bemessung des Eisplombenankers

Glg. (8) dient zur Berechnung der Belastbarkeit bei vorgegebener Lebensdauer unter Berücksichtigung der Ankerlänge bzw. der Eistemperatur. Stellt man die Gleichung um, erhält man

$$t_3 = \frac{\epsilon_3}{\epsilon_m} \cdot \left(\frac{\tau_f}{1 \cdot \tau_m} \cdot e^{\frac{Q}{R} \left(\frac{264,5 - T}{264,5 - T_m} \right)} \right)^{-m} \quad (9)$$

womit sich bei gegebener Belastung die Lebensdauer errechnen läßt. Berücksichtigt man außerdem die in 6.3 beschriebenen

konstruktiven Einflüsse, läßt sich auf der Grundlage der Glgn (8) bzw. (9) ein Nomogramm erstellen, aus dem mit den Parametern Ankerplattendurchmesser d , Ankerlänge l_A und Verankerungslänge l jeweils die zulässige Belastung P_f bzw. die zulässige Lebensdauer t_3 abzulesen ist. Dieses Nomogramm ist in Bild 6.7 dargestellt. Der Einfluß der Ankerplattengröße (s. 5.5.4) wurde dadurch berücksichtigt, daß bei größeren Ankerplatten eine Abminderung von P_f durchgeführt wurde.

Aus Glg. (8) folgt daher für die zulässige Belastung P_f (in N) bei gegebener Lebensdauer t_3 (in s)

$$P_f = \tau_f \cdot (d + 16) \left(\frac{d}{2} - 8 \right) \frac{\pi}{2} \frac{1}{\cos 50^\circ} \cdot e^{\frac{Q}{R}(264,5-T)} =$$

$$1 \cdot \tau_m \cdot (d + 16) \left(\frac{d}{2} - 8 \right) \cdot 0,78\pi \left(\frac{\epsilon_3}{t_3 \epsilon_m} \right)^{\frac{1}{m}} \cdot e^{\frac{Q}{R}(264,5-T)} \quad (10)$$

bzw. für die zulässige Lebensdauer

$$t_3 = \frac{\epsilon_3}{\epsilon_m} \left(\frac{P_f}{1 \cdot \tau_m \cdot (d + 16) \left(\frac{d}{2} - 8 \right) \cdot 0,78\pi} \cdot e^{\frac{Q}{R}(264,5-T)} \right)^{-m} \quad (11)$$

In diesem Nomogramm wie auch in den Bildern 6.3 und 6.6 wird eine Extrapolation des Verformungsverhaltens für einen Zeitraum von 250 Tagen aufgrund von Versuchen vorgenommen, die nur einige Minuten dauerten. Beweis für die Realisierbarkeit dieser Extrapolation sind Langzeitversuche über mehrere Monate von verschiedenen Verfassern /22, 23, 36, 60/, die aufgrund der Ergebnisse ihrer Versuche die Grundlage für die hier verwendeten theoretischen Modelle schufen und so bewiesen haben, daß das Langzeitverhalten von Eis aus den sekundären Verformungsgeschwindigkeiten von Kurzzeitversuchen abgeleitet werden kann. Zudem ist von einer Gesamtverformung von nur 30 mm bis zum Beginn des Versagens ausgegangen worden.

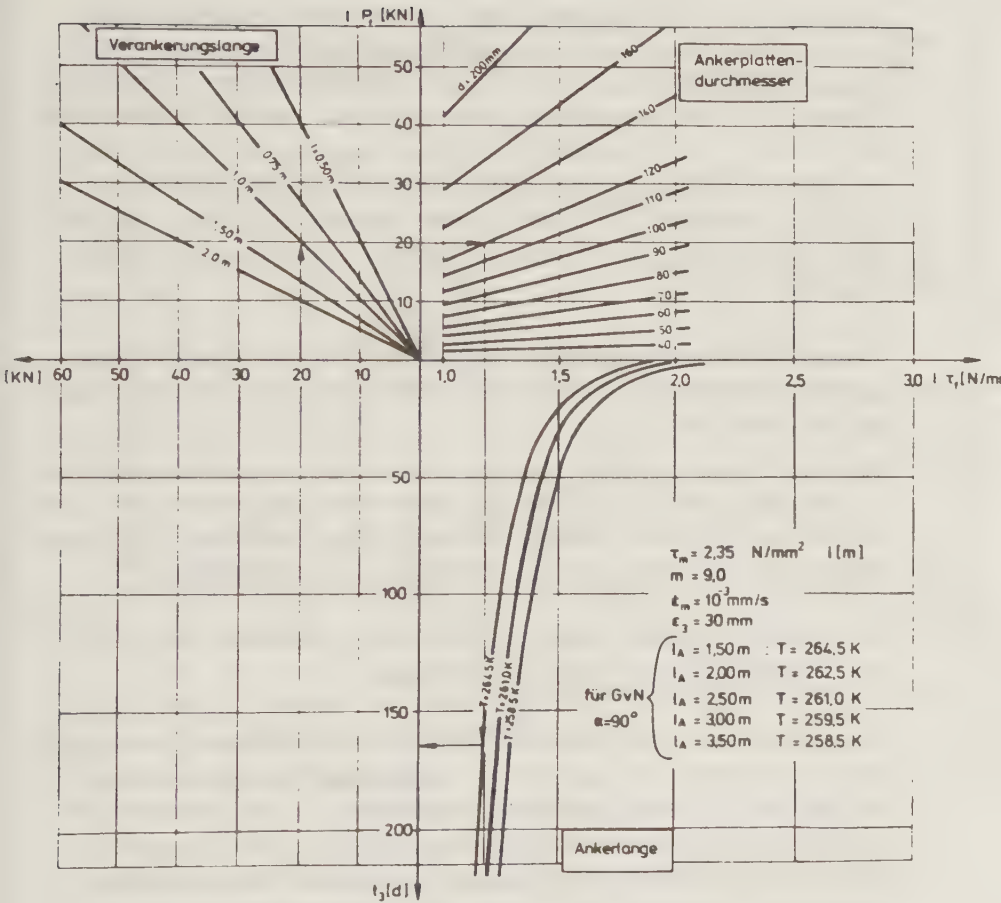


Bild 6.7: Nomogramm zur Bemessung des Eisplombenankers

Es wurde nur ein Versuch durchgeführt, um Vergleichsmöglichkeiten des Verformungsverhaltens des Eisplombenankers unter

konstanter mit dem unter dynamischer Belastung zu erhalten (Bild 5.13). Man kann aus dem Ergebnis dieses Versuches und aus Abschnitt 2.5 die Schlußfolgerung ziehen, daß sich bei dynamischer Belastung abhängig von der Belastungs- bzw. Verformungsgeschwindigkeit um ein Vielfaches höhere Kriechfestigkeiten bzw. Lebensdauern ergeben (bezogen auf die Maximallast).

Bei Bemessung eines Eisplombenankers, der in einem Winkel $\alpha \neq 90^\circ$ eingebaut ist, muß bei den Glgn (9) bis (11) die Neigung des Ankers bei der Ermittlung der Eistemperatur berücksichtigt werden.

Das im Nomogramm angegebene Beispiel macht den Zusammenhang zwischen zulässiger Belastung und zulässiger Lebensdauer noch einmal deutlich:

Bei einer Verankerungslänge von $l = 1,00$ m, einem Ankerplatten-durchmesser von $d = 120$ mm und einer Ankerlänge von $l_A = 1,50$ m ist an der Georg-von-Neumayer-Station eine Belastung von 20 kN über einen Zeitraum von ca. 165 Tagen aufzunehmen.

Auf dem umgekehrten Weg läßt sich die aufnehmbare Belastung bei vorgegebener Lebensdauer bestimmen.

Für einen Vergleich des hier vorgestellten Bemessungsansatzes mit den tatsächlich gemessenen Werten sind in Bild 6.8 jeweils für die vier Langzeitversuche L1/1, L1/2, L2/2 und L6 die in situ protokollierten Kriechkurven und das errechnete sekundäre Kriechverhalten gegenübergestellt. Mit einer Ausnahme beim Versuch L1/2, wo bei einem berechneten Wert von $\dot{\epsilon}_2 = 1,1 \times 10^{-3}$ mm/s unter einer Belastung von $31,31$ kN eine tatsächliche sehr viel geringere Verformungsgeschwindigkeit von $2,8 \times 10^{-4}$ mm/s ermittelt wurde, stimmen die gemessenen und die berechneten Werte sehr gut überein. Selbst die Verformungsgeschwindigkeit beim Versuch L2/2, bei dem unter $44,77$ kN der Anker versagt, ist relativ gut rechnerisch be-

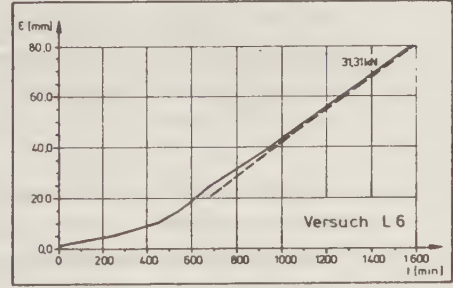
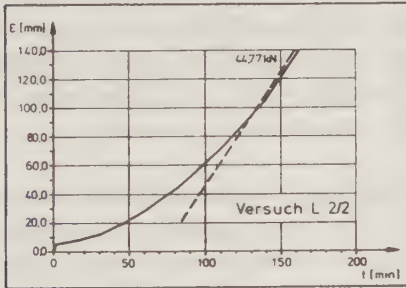
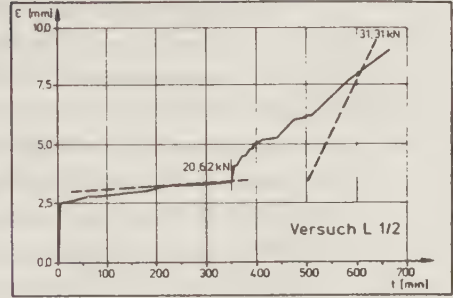
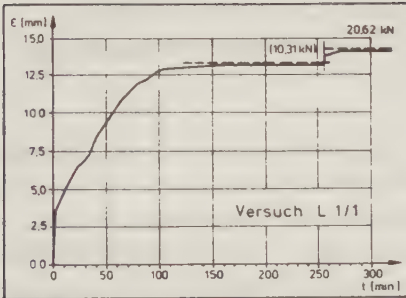


Bild 6.8: Vergleich von gemessenem und berechnetem Kriechverhalten der Langzeitversuche

— gemessen
 ---- berechnet

stimmt. Dies bestätigt die gute Anwendbarkeit dieses Bemessungsansatzes.

6.5 Berechnung der Gefrierdauer der Eisplombe

Der Vorgang vom Einfüllen der Carboxymethylcellulose/Wasser-Mischung ins Bohrloch bis zu deren Abkühlung auf Umgebungs-

temperatur besteht aus den drei Phasen

1. Abkühlung des Gemisches auf 0°C
2. Gefrieren des 0°C kalten Gemisches zu Eis
3. Abkühlung des entstandenen Eises auf Umgebungstemperatur

Eine exakte Beschreibung und Berechnung der einzelnen Phasen wie auch des Gesamtvorgangs sind nicht möglich, da eine zylindermantelförmige Isothermenfläche den abzukühlenden bzw. den zu gefrierenden Körper zu jeder Zeit in einen ungefrorenen Zylinder und einen gefrorenen Hohlzylinder teilt, wobei sich außerdem die Lage dieser Trennfläche noch zeitlich ändert. Aus dem Erstarrungsprozeß wird ständig Wärmeenergie frei, die umgebendes Schelfeis schmelzt, das ebenfalls wieder erstarren und weitere Wärmeenergie freisetzen wird, die ihrerseits sowohl nach außen wie nach innen Umgebungseis schmelzt.

Es läßt sich nur grob abschätzen, welche Bereiche in welchem Maße von dieser Wärmeenergie beeinflußt werden. Sowohl die freiwerdende Wärmemenge als auch die Temperaturfelder jeder dieser drei Phasen sind jeweils nur durch gekoppelte Differentialgleichungssysteme zu berechnen, bei denen analytische Lösungen nur näherungsweise und unter Annahme vereinfachender Randbedingungen möglich sind. Betrachtet man die Abkühlvorgänge (Phasen 1 und 3) vereinfachend als separate Einzelvorgänge, läßt sich das jeweilige Temperaturfeld nach den thermodynamischen Gesetzen /20/

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = - \nabla \dot{q} \quad (12)$$

und $\dot{q} = - \lambda \nabla T \quad (13)$

mit λ Wärmeleitfähigkeit ($\text{W/m}^{\circ}\text{C}$)
 $a = \frac{\lambda}{\rho C}$ Temperaturleitfähigkeit (m^2/s)

ρ	Dichte (kg/m^3)
C	spez. Wärmekapazität ($\text{J/m}^3\text{ }^\circ\text{C}$)
T	Temperatur ($^\circ\text{C}$)
t	Zeit (s)
$\dot{q}$	Wärmefluß (W)
α	Wärmeübergangskoeffizient ($\text{W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$)
$Bi = \frac{\alpha r}{\lambda}$	Biot-Zahl (-)
$Fo = \frac{\alpha t}{r^2}$	Fourier-Zahl (-)

berechnen zu

$$T = \sum_{i=1}^n C_i(m_i) f(m_i, \xi) e^{-m_i^2 Fo}, \quad (14)$$

wobei $C_i(m_i)$ und $f(m_i, \xi)$ in Bessel'schen Funktionen J_0 und J_1 dargestellt werden, deren Eigenwerte m_i sich graphisch oder iterativ ermitteln lassen /20/, so daß sich T ergibt zu

$$T = 1,613 J_0(2,405 \frac{x}{r}) e^{-(2,405)^2 \frac{at}{r^2}} \quad (15)$$

mit x Konstante ($0 \leq x \leq r$),

was in Nomogrammen (s. z.B. VDI-Atlas /61/) jeweils in Abhängigkeit von Bi und Fo darzustellen ist.

Setzt man näherungsweise

$$\begin{aligned} a &\approx 4 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s} \\ \lambda &\approx 0,4 \text{ W/m}^\circ\text{C} \\ \alpha &\approx 500 \text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}, \end{aligned}$$

erhält man

$$Fo = \frac{at}{r^2} = 4 \cdot 10^{-3} t \frac{1}{r^2}$$

und

$$Bi = \frac{\alpha r}{\lambda} = 12,5 r$$

In Bild 6.9 wird als Beispiel für ein Bohrloch $r = 6$ cm die Zeit für den Abkühlvorgang von Einfülltemperatur T_G auf T_G/T (Phase 1) dargestellt. Analog ließe sich auch der Abkühlvorgang des entstandenen Eises auf Schelfeistemperatur (Phase 3) ermitteln und darstellen.

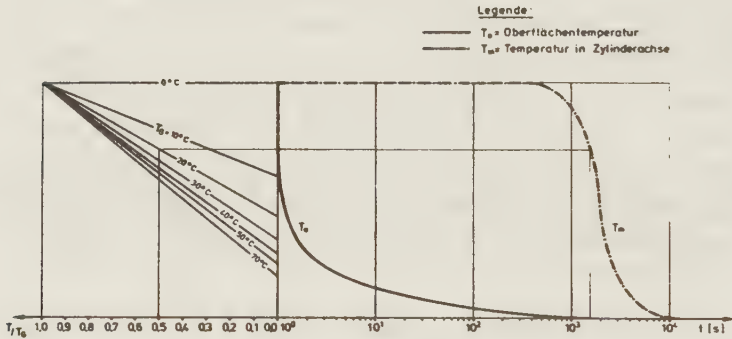


Bild 6.9: Nomogramm zum Abkühlvorgang des Gemisches in einem Bohrloch $r = 6$ cm

Crory hat 1966 /10/ eine Näherungslösung entwickelt, um die Zeit zu bestimmen, die erforderlich ist, um Pfähle in Permafrost wiedergefrieren zu lassen. Modifiziert man diese Gleichung für das Gefrieren der in ein Bohrloch im Schelfeis eingefüllten Mischung (Phase 2), erhält man

$$t \approx \frac{r^2}{a} \left(\frac{q}{9,3 C r^2 T} \right)^{\frac{4}{3}} \quad (16)$$

mit

$$q = \pi C_1 \left(r^2 - \frac{d^2}{4} \right) \rho$$

t Gefrierzeit (s)

C Wärmekapazität Schelfeis ($J/m^3 \text{ } ^\circ C$)

- a Temperaturleitfähigkeit Schelfeis (m^2/s)
- T Umgebungstemperatur Schelfeis ($^{\circ}\text{C}$)
- r Bohrlochradius (cm)
- d' Ankerstabdurchmesser (cm)
- C_1 Wärmekapazität Gemisch (J/kg)
- ρ Dichte Gemisch (kg/m^3)

Setzt man $C_1 = 335.000 \text{ J/kg}$
 $d' = 1,6 \text{ cm}$
 $\rho = 900 \text{ kg/m}^3$

ein, so erhält man für q

$$q = 1,05 \cdot 10^5 r^2, \quad (17)$$

woraus sich für t die Gefrierzeit für das Gemisch ergibt zu

$$t \approx 5,47 \cdot 10^6 (\text{CT})^{-\frac{4}{3}} \frac{r^2}{a} \quad (18)$$

Bild 6.10a erlaubt die Bestimmung von t in Abhängigkeit von r, T, a und C. Setzt man für Verhältnisse im Schelfeis /31/

$$a = 4 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$$

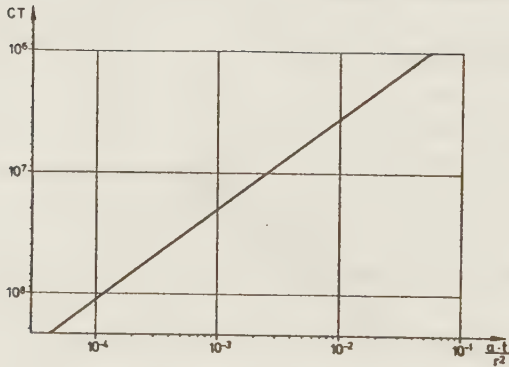
$$C = 1 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3 {}^{\circ}\text{C},$$

erhält man für t die Näherung

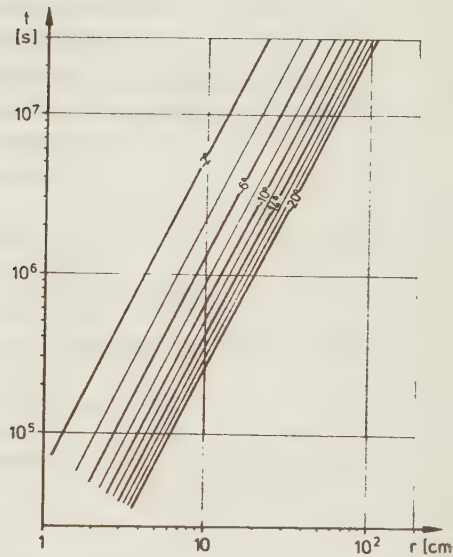
$$t \approx 1,4 \cdot 10^5 T^{-\frac{4}{3}} r^2 \quad (19)$$

Diese Beziehung ist in Bild 6.10b dargestellt, das die Bestimmung von t(T,r) für $T = -20 \dots -2^{\circ}\text{C}$ und $r = 2 \dots 100 \text{ cm}$ zeigt.

Da sich für diese reine Gefrierzeit, also den Wechsel des Aggregatzustandes (Phase 2), ca. 85 % der Zeitdauer des Gesamtvorgangs ergeben, wird für die Bestimmung der Gefrier-



a)



b)

Bild 6.10: Nomogramme zur Bestimmung der reinen Gefrierzeit einer Eisplombe

a) in Abhängigkeit von r , T , a und C

b) in Abhängigkeit von r und T

zeit der Eisplombe des Eisplombenankers vorgeschlagen, die Näherungslösung für die reine Gefrierzeit aus Bild 6.10 zu entnehmen, die Abkühlzeiten von Einfülltemperatur T_G auf 0°C bzw. von 0°C auf die Schelfeistemperatur T_∞ zu vernachlässigen oder nur mit einem linearen Faktor $f = 1,15 + (T_G - T_\infty)/500$ auf die reine Gefrierzeit zu berücksichtigen.

Aus Bild 6.10b lässt sich für die reine Gefrierzeit der Eisplombe in einem Bohrloch $r = 6,5 \text{ cm}$ bei einer Schelfeistemperatur von -8°C ein Wert von ca. 320.000 Sekunden ablesen,

der, multipliziert mit $f = 1,196$ (bei $T_G = 15^\circ\text{C}$), eine Gesamtzeit für den Gefriervorgang von ungefähr 383.000 Sekunden ergibt. Dies sind rund 106 Stunden, was gut mit den tatsächlich gemessenen Zeiten übereinstimmt.

7. Vergleich des Tragverhaltens des Eisplombenankers mit dem anderer Zuganker in Eis und Schnee

Bei der Antarktis-Expedition 1980/81 wurden Ankerzugversuche zum direkten Vergleich des Eisplombenankers mit Schraubenankern (4.4.3) und eingegrabenen Ankern (4.4.2) durchgeführt. Während beim Eisplombenanker die aufgebrachte Belastung vom Celluloseäther/Wasser-Gemisch-Eis aufgenommen wird, ist es beim Schraubenanker das Schelfeis selbst und beim eingegrabenen Anker der wiederverfüllte Schnee.

Bild 7.1 zeigt einen Vergleich der Verformungsgeschwindigkeiten der drei Ankertypen unter jeweils gleichen äußeren Bedingungen.

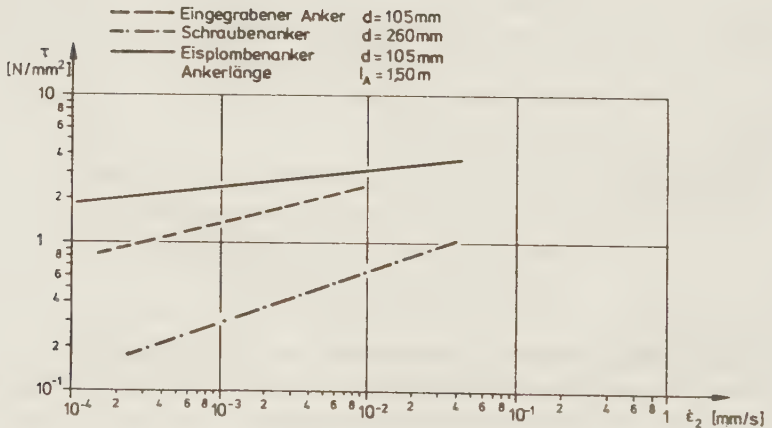


Bild 7.1: Verformungsgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von der aufgebrachten Belastung bei $l_A = 1,50$ m von Eisplomben-, Schrauben- und eingegrabenen Ankern

Vereinfachend wird für den eingegrabenen Anker und für den Schraubenanker eine analoge Scherfläche angenommen; daher

gelten ebenfalls die Glgn. (5) bis (11), so daß sich die Kriechfestigkeiten in Abhängigkeit von der Lebensdauer für die drei Ankertypen darstellen lassen. Bild 7.2 zeigt diesen Vergleich.

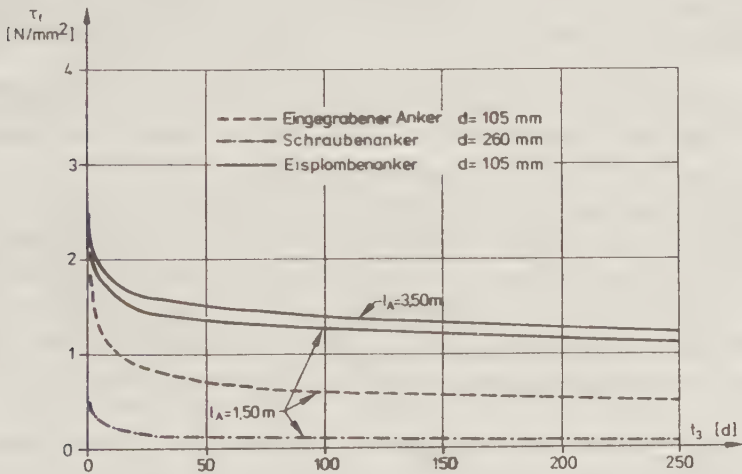


Bild 7.2: Kriechfestigkeiten von Eisplomben-, Schrauben- und eingegrabenen Ankern als Funktion der Zeit bis zum Versagen des Ankers t_3

Dabei gelten bei $\dot{\epsilon}_m = 10^{-3}$ mm/s und $\epsilon_3 = 30$ mm durchschnittlich für den Schraubenanker $\tau_m = 0,3$ N/mm² und $m = 2,9$ und für den eingegrabenen Anker $\tau_m = 1,45$ N/mm² und $m = 6,0$.

Bei den Bildern 7.1 und 7.2 ist zu beachten, daß beim Eisplombenanker und beim eingegrabenen Anker eine Ankerplatte $\varnothing 105$ mm und beim Schraubenanker eine Ankerplatte $\varnothing 260$ mm verwendet wurde.

Vergleicht man nun die aufnehmbare Belastung für eine vorgege-

bene Lebensdauer von z.B. 200 Tagen, erhält man mit Glg. (10) für den Eisplombenanker ($\varnothing$ 105 mm) 15,3 kN, für den eingegrabenen Anker ($\varnothing$ 105 mm) 6,61 kN und für den Schraubenanker ($\varnothing$ 260 mm) 2,4 kN. Will man die Lebensdauer bei gegebener konstanter Belastung von z.B. 10 kN bestimmen, ergeben sich nach Glg. (11) für den Eisplombenanker ca. 9.000 Tage, für den eingegrabenen Anker 17 Tage und für den Schraubenanker 3,3 Tage.

Aus verfahrenstechnischer Sicht zeigt sich der Vorteil des Eisplombenankers hinsichtlich des Aufwands an Arbeit und Kosten besonders deutlich an einem Verankerungsproblem von z.B. 10 kN über 200 Tage bei jeweils gleicher Ankerlänge $l_A = 1,50$ m: Beim Einsatz des Eisplombenankers genügt ein einziger Anker mit einer Ankerplatte $d = 105$ mm, diesen Anforderungen zu genügen. Verwendet man eingegrabene Anker, so sind entweder zwei Anker mit einer Ankerplatte $d = 105$ mm erforderlich oder ein Anker entweder mit einer erheblich größeren Ankerplatte, die wiederum einen erheblich größeren Aufwand nötig macht, oder mit einer Ankerplatte $d = 105$ mm, was aber den Einbau eines neuen Ankers jeweils nach 17 Tagen erfordern würde. Beim Einbau von Schraubenankern müßten 5 Anker mit einer Ankerplatte $d = 260$ mm eingesetzt werden; selbst bei Vergrößerung der Ankerplatte wären noch mehrere Schraubenanker erforderlich. Die Lebenszeit eines einzelnen Schraubenankers ist mit rund drei Tagen dagegen so gering, daß ein jeweils nötiger Neueinbau eines Ankers nach drei Tagen völlig unrentabel wäre.

Zudem ist der Einbau eines Eisplombenankers gegenüber einem eingegrabenen Anker einfacher und problemloser, da die Verdichtungsarbeit beim hier eingesetzten eingegrabenen Anker schwierig, aufwendig und außerdem auf vollständige Verdichtung hin nicht überprüfbar ist, während beim Eisplombenanker das Hineinschütten der Carboxymethylcellulose/Wasser-Mischung ausreicht.

8. Zusammenfassung und Schlußbemerkungen

Die steigende Intensität der Antarktisaktivitäten der Bundesrepublik Deutschland innerhalb der letzten fünf Jahre läßt darauf schließen, daß auch über die Geltungsdauer des jetzigen, bis 1991 befristeten Antarktisvertrages hinaus deutsche Forscher und Wissenschaftler in der Antarktis tätig sein werden. Es ist mit Sicherheit davon auszugehen, daß zur Realisierung der dann anstehenden Aufgaben Bedarf an technischem Know-how antarktis-erfahrener Bauingenieure entstehen wird.

Jedes neu zu errichtende Bauwerk, seien es Wohnunterkünfte oder wissenschaftliche Meßeinrichtungen, bedarf wegen der extremen Witterungsverhältnisse auf dem antarktischen Kontinent einer Abspannung bzw. Verankerung. Ziel des vom Lehrstuhl für Bauverfahrenstechnik und Baubetrieb der Ruhr-Universität Bochum durchgeführten Forschungsprojektes war die Entwicklung eines an die Bedingungen der Antarktis angepaßten Zugankers.

Die vorliegende Arbeit ist das Ergebnis der an Ort und Stelle durchgeführten Versuche und deren Auswertung. Aufgrund der viskoelastischen Eigenschaften von Schnee und Eis stellen sich bei Zugbelastung von Ankern im Schelfeis Kriechverformungen ein, deren Größenordnung von der aufgebrachten Belastung abhängt. Eine rechnerische Bestimmung dieser Kriechverformungen ist durch Modifizierung von für Laborbedingungen geltenden Kriechgesetzen möglich gewesen. Durch die so beschriebene Abhängigkeit der Verformung von der Belastung konnten zunächst die sekundären Verformungsgeschwindigkeiten und damit die Gesamtverformung bis zum Bruch des Ankers bestimmt werden. Wegen der guten Übereinstimmung der in situ gemessenen Verformungen bzw. Verformungsgeschwindigkeiten mit den verwendeten Kriechgesetzen wurde dann die zulässige Belastung bzw. die mögliche Lebensdauer des Zugankers berechnet.

Bei dieser Auswertung zeigte sich, daß der neu entwickelte Eisplombenanker aufgrund der gegenüber Schnee und Eis höheren Festigkeit des Carboxymethylcellulose/Wasser-Gemisch-Eises, das den Verankerungskörper des Eisplombenankers bildet, sowohl in kurz- und langfristiger Tragfähigkeit als auch hinsichtlich seiner Lebensdauer vergleichbaren Ankern im Schelfeis überlegen ist. Für diesen Anker wurde dann ein Bemessungsnomogramm entwickelt, das die Bestimmung von zulässiger Belastung und zulässiger Lebensdauer unter Berücksichtigung konstruktiver Parameter ermöglicht.

Die Versuche ergaben eine Eignung des Eisplombenankers bei Einsatz in vertikaler Lage bis zu einer Neigung von 45° . Soll der Anker in Gruppen angeordnet werden, erlaubt das Konstruktionsprinzip des Eisplombenankers zudem sehr geringe Ankerabstände.

Die Dimensionen seiner Eisplombe hängen von Temperatur und Volumen der Einfüllmischung ab. Bei 0 bis 10°C Einfülltemperatur liegt der durchschnittliche mittlere Durchmesser der Eisplombe bei 13,5 cm, bei 10 bis 20°C bei ca. 16,0 cm und bei 20 bis 35°C bei ca. 18,4 cm. Sowohl Durchmesser wie auch Verankerungslänge hängen in hohem Maße von der Beschaffenheit und der Schichtung der entsprechenden Tiefenlage ab. Diese Einflüsse können vor Einbau des Ankers jeweils nur durch Probebohrungen bestimmt werden.

Die Verankerungslänge l sollte so groß wie möglich gewählt werden, da eine direkte Abhängigkeit von Belastbarkeit und Verankerungslänge festgestellt wurde. So führt eine größere Verankerungslänge zu geringeren Verformungsgeschwindigkeiten und generell bei konstanten Verformungsgeschwindigkeiten zu längerer Lebensdauer des Eisplombenankers.

Von der Ankerlänge l_A hängt die sich einstellende Temperatur

des entstehenden Gemisch-Eises ab. Mit wachsender Ankerlänge und damit mit sinkender Gemisch-Eis-Temperatur verbessern sich die Eigenschaften des Eisplombenankers in allen Belastungsstufen. Allerdings muß darauf geachtet werden, daß mindestens eine Ankerlänge von ca. 1,00 m vorhanden ist, da im Bereich bis zu 1,00 m Tiefe das Schelfeis eine zu geringe bzw. zu wechselhafte Dichte aufweist.

Eine Vergrößerung der Ankerplatte führt in jedem Falle zu einer Vergrößerung der Tragfähigkeit des Ankers; allerdings ist diese Vergrößerung der Tragfähigkeit nicht linear zur Vergrößerung des Ankerplattendurchmessers, sondern bei großen Ankerplatten etwas abgemindert.

Die angegebene analytische Methode zur Berechnung der Gefrierdauer einer Eisplombe führt zu guter Übereinstimmung der auf diese Weise bestimmten Werte mit den tatsächlich gemessenen.

Nur am Rande wurde bei dieser Arbeit eine dynamische Belastung des Ankers berücksichtigt. Wegen der Unmöglichkeit der Festlegung einer signifikanten Belastungsfrequenz, z.B. für Windbelastung an einer bestimmten Stelle der Antarktis, wurden fast alle Versuche mit konstanter Belastung durchgeführt. Es steht allerdings fest, daß sämtliche Werte, die aufgrund dieser Versuche ermittelt worden sind, bei weitem auf der sicheren Seite liegen, da sich bei dynamischer Belastung wesentlich geringere Verformungen und Verformungsgeschwindigkeiten und damit wesentlich höhere Belastbarkeit bzw. Lebensdauer einstellen, wenn man die statische Belastung und die maximale dynamische Last vergleicht.

Generell versagt ein Zuganker in Eis und Schnee nicht durch das Herausbrechen des belasteten Schneekegels, es sei denn, die aufgebrachte Zugbelastung ist im Verhältnis zur Einbindetiefe sehr groß. Während sich aber bei eingegrabenen Ankern

und bei Schraubenankern ansonsten ein Versagen durch Herausziehen der Ankerplatte einstellt, ist beim Eisplombenanker das Durchstanzen der Ankerplatte durch die Eisplombe die Versagensursache.

Hinsichtlich des Aufwands an Arbeit und Kosten ist der Einsatz eines Eisplombenankers aus verfahrenstechnischer Sicht besonders vorteilhaft, da bei gleicher Dimensionierung ein einziger Eisplombenanker die gleiche Aufgabe erfüllt wie zwei eingegrabene Anker oder mehrere Schraubenanker. Außerdem ist der Einbau eines Eisplombenankers im Vergleich zu anderen Ankers einfach und wenig arbeitsaufwendig.

Hingewiesen sei noch auf einen Versuch mit einem Anker, der - wie der Eisplombenanker auf dem Prinzip des Verpreßankers basierend - einen Verankerungskörper aus Polyurethanschaum hatte: In einem Bohrloch wurde eine flüssige PU-Mischung eingefüllt, dort reagierte der Kunststoff, schäumte von ca. 3,5 l Ausgangsvolumen auf ca. 10 l auf und war nach einer Stunde zu einem festen Verankerungskörper erstarrt. Bild 8.1 zeigt einen solchen PU-Anker nach dem Herausziehen aus dem Bohrloch.

Für eine statistisch abgesicherte Aussage über die Tragfähigkeit eines PU-Ankers wurden zu wenig Versuche durchgeführt. Da sich jedoch recht brauchbare Ergebnisse abzeichneten, sei er als sehr kurzfristig belastbare Alternative zum Eisplombenanker erwähnt, zumal ein PU-Anker auch bei Schneetemperaturen von 0 °C, wie sie z.B. in den Gletschern der Alpen herrschen, eingesetzt werden könnte, wo ein Eisplombenanker eben wegen dieses warmen Schnees nicht zu verwenden ist.

Daher erscheinen weitere Untersuchungen des PU-Ankers erfolgversprechend.

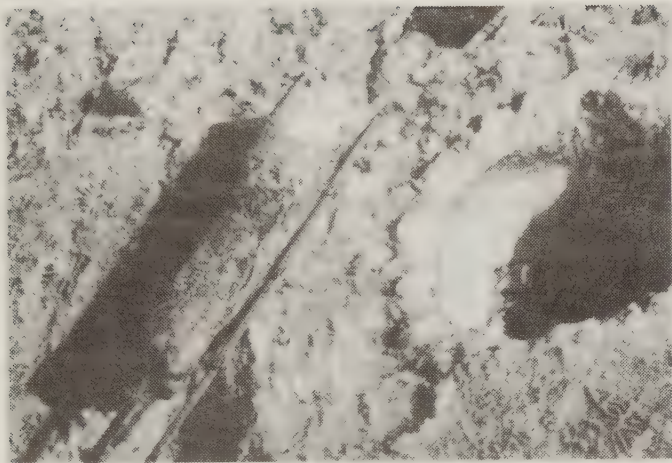


Bild 8.1: PU-Anker

9. Literaturverzeichnis

- /1/ Bader, H.:
Theory of Densification of Dry Snow on High Polar
Glaciers.
U.S. Army Snow, Ice and Permafrost Research Establishment.
Research Report 69, January 1960.
- /2/ Bader, H.:
Theory of Densification of Dry Snow on High Polar
Glaciers. II.
Ice and Snow. Conference Massachusetts 1962, p. 351 -
376.
- /3/ Bader, H.; Kuroiwa, D.:
The Physics and Mechanics of Snow as a Material.
CRREL Monograph II-B, 1962.
- /4/ Bernath, J.; Hirt, F.; Marth, E.; v. Matt, U.:
Versuche an vertikalen Zugverankerungen.
Schweizerische Bauzeitung 93 (1975), S. 779 - 783.
- /5/ Brühl, H.:
Herstellen von Zugankern mit Eisplombe.
Berichte zur Polarforschung 14/83, in Vorbereitung.
- /6/ Brühl, H.:
Entwicklung eines Zugankers für den Einsatz in der
Antarktis.
Ruhr-Universität Bochum 1984, KIB-Vortrag.
- /7/ Busch, D.:
Die während der Filchner-Schelfeis-Expedition 1980/81
durchgeführten Arbeiten zur konstruktiven Ausbildung,
Einbautechnologie und Bemessung von Ankern im Schnee.
Berichte zur Polarforschung 1/82, S. 30 - 32.
- /8/ Butkovich, T.R.:
Hardness of Single Ice Crystals.
U.S. Snow, Ice and Permafrost Research Establishment.
Research Paper 9, 1954.
- /9/ Carter, D.:
Brittle Fracture of Snow Ice.
Proceedings IAHR Symposium, Reykjavik, Iceland, section
5.2, 1970.
- /10/ Crory, F.E.:
Pile Foundations in Permafrost.
U.S. National Academy of Sciences, Publ. 1287, p. 467 -
476, 1966.
- /11/ Dörr, R.:
Zeitabhängiges Setzungsverhalten von Gründungen in Schnee,
Firn und Eis am Beispiel der deutschen Georg-von-Neumayer-
und Filchner-Station in der Antarktis.
Dissertation Ruhr-Universität Bochum 1983.

- /12/ Favre, R.:
Die neue Norm SIA 191 "Boden- und Felsanker": eine Grundlage für die Verständigung.
Schweizerische Bauzeitung 96 (1978), S. 751 - 752.
- /13/ Fuchs, G., Lindner, K.:
Anchoring Tests on the Filchner/Ronne Ice Shelf 1979/80.
Polarforschung 51 (1981), H. 1, S. 85 - 90.
- /14/ Fust, U.:
Theoretische Untersuchungen zum Einsatz von Ankern in Schnee und Eis.
Diplomarbeit Ruhr-Universität Bochum 1981.
- /15/ Glen, J.W.:
The Creep of Polycrystalline Ice.
Proceedings Royal Society, vol. 228, 1955, p. 519 - 538.
- /16/ Glen, J.W.:
The Rheology of Ice.
Ice and Snow. Conference Massachusetts 1962, p. 3 - 7.
- /17/ Glen, J.W.:
The Physics of Ice.
CRREL Monograph II-C2a, April 1974.
- /18/ Glen, J.W.:
The Mechanics of Ice.
CRREL Monograph II-C2b, December 1975.
- /19/ Gold, L.W.:
Deformation Mechanism in Ice.
Ice and Snow. Conference Massachusetts 1962, p. 8 - 27.
- /20/ Gröber, H., Erk, S., Grigull, U.:
Die Grundgesetze der Wärmeübertragung.
Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 1963.
- /21/ Haefeli, R.:
Erdbaumechanische Probleme im Lichte der Schneeforschung.
Mitteilungen aus der Versuchsanstalt für Wasserbau an der ETH Zürich, Nr. 7, 1944.
- /22/ Haefeli, R.:
Observations in Ice Tunnels and the Flow Law of Ice.
Ice and Snow. Conference Massachusetts 1962, p. 162 - 186.
- /23/ Hawkes, I., Mellor, M.:
Deformation and Fracture of Ice under Uniaxial Stress.
Journal of Glaciology, vol. 11, no. 61, 1972, p. 103 - 131.
- /24/ Haynes, F.D.:
Tensile Strength of Ice under Triaxial Stresses.
CRREL Research Report 312, December 1973.

- /25/ Haynes, F.D.:
Effect of Temperature on the Strength on Snow-ice.
CRREL Report 78-27, December 1978.
- /26/ Hironaka, M.C.:
Anchoring in Snow, Ice and Permafrost.
Civil Engineering Laboratory Port Hueneme.
Technical Note N-1344, June 1974.
- /27/ Huder, J.:
Boden- und Felsanker: Anforderungen, Prüfung und Bemessung.
Schweizerische Bauzeitung 96 (1978), S. 753 - 761.
- /28/ Hutter, K.:
Stoffgleichungen für Eis.
Zeitschrift für Gletscherkunde und Glaziologie, Bd. 15,
H. 1, 1979, S. 47 - 63.
- /29/ Jessberger, H.L., Dörr, R.:
Untersuchung des Bruch- und Verformungsverhaltens von
antarktischen Schelfeis.
Die Bautechnik 58 (1981), S. 388 - 394.
- /30/ Jessberger, H.L., Bässler, K.H.:
Langfristige Messungen auf dem Ekstroem-Schelfeis zur
Beurteilung des Verformungsverhaltens antarktischer
Schelfeismassen.
13. Internationale Polartagung 1983 in Bamberg.
- /31/ Jessberger, H.L., Bässler, K.H.:
Model Tests and In Situ Behaviour of Prestressed Anchors
in Snow and Ice.
IAHR Ice Symposium 1984, Hamburg.
- /32/ Johnston, G.H., Ladanyi, B.:
Field Tests of Deep Power-installed Screw Anchors in
Permafrost.
Canadian Geotechnical Journal 11 (1974), p. 348 - 358.
- /33/ Johnston, G.H., Ladanyi, B.:
Field Tests of Grouted Rod Anchors in Permafrost.
Canadian Geotechnical Journal 9 (1972), p. 176 - 194.
- /34/ Kaplar, C.W.:
Laboratory Determination of Dynamic Moduli of Frozen
Soils and Ice.
CRREL Research Report 163, 1969.
- /35/ Kohnen, H.:
Antarktis-Expedition.
Bergisch-Gladbach: Lübbe-Verlag 1981.
- /36/ Kovacs, A.:
Feasibility Study of Buried Anchors in Polar Snow.
CRREL Special Report 107, March 1967.

- /37/ Kovacs, A.:
Study of Piles Installed in Polar Snow.
CRREL Report 76-23, July 1976.
- /38/ Kovacs, A., Blouin, S., McKelvy, B., Colligan, H.:
On the Theory of Ground Anchors.
CRREL Technical Report 258, January 1975.
- /39/ Kraus, H.:
Creep Analysis.
John Wiley & Sons 1980.
- /40/ Ladanyi, B.:
An Engineering Theory of Creep of Frozen Soils.
Canadian Geotechnical Journal 9 (1972), p. 63 - 80.
- /41/ Lange, M., Ahrens, T.:
The Dynamic Tensile Strength of Ice and Ice-silicate
Mixtures.
Journal of Geophysical Research, vol. 88, no. 82, 1983,
p. 1197 - 1208.
- /42/ Maidl, B., Brühl, H.:
Experimentelle Untersuchungen zur Tragfähigkeit von Zug-
ankern im Schelfeis der Antarktis.
Forschungsbericht Ruhr-Universität Bochum, 1984.
Unveröffentlicht.
- /43/ Maidl, B., Brühl, H.:
Der Eisplombenanker - Entwicklung eines neuen Zugankers
für den Einsatz in Eis und Schnee.
Die Bautechnik 64 (1985), S. 37 - 46.
- /44/ Maidl, B., Brühl, H.:
Development of a New Anchor for Snow and Ice.
4th International Symposium on Offshore Mechanics and
Arctic Engineering, Dallas, 1985.
- /45/ McKelvy, B.:
Basic Anchor Configurations.
CRREL Technical Note, September 1971.
- /46/ Mellor, M.:
Polar Snow - a Summary of Engineering Properties.
Ice and Snow. Conference Massachusetts 1962, p. 528 - 559.
- /47/ Mellor, M.:
A Review of Basic Snow Mechanics.
International Committee in Snow and Ice, Publ. 114, 1975,
p. 251 - 291.
- /48/ Mellor, M.:
Properties of Snow.
CRREL Monograph III-A1, December 1964.
- /49/ Mellor, M.:
Engineering Properties of Snow.
Journal of Glaciology, vol. 19, no. 81, 1977, p. 15 - 66.

- /50/ Mellor, M., Smith, J.:
Strength Studies of Snow.
CRREL Research Report 168, 1966.
- /51/ Müller, H.R.:
Erfahrungen mit Verankerungen System BBRV in Fels- und
Lockergesteinen.
Schweizerische Bauzeitung 84 (1966), S. 77 - 82.
- /52/ Nadai, A.:
Theory of Flow and Fracture of Soils.
New York: McGraw-Hill 1963.
- /53/ Odquist, F.K.G., Hult, D.L.:
Kriechfestigkeit metallischer Werkstoffe.
Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 1962.
- /54/ Penny, R.K., Mariott, D.L.:
Design for Creep.
New York: McGraw-Hill 1971.
- /55/ Ramseier, R.O.:
Some Physical and Mechanical Properties of Polar Snow.
Journal of Glaciology, vol. 4, no. 36, 1963, p. 753 -
769.
- /56/ Ramseier, R.O.:
Some Physical and Mechanical Properties of Polar Snow.
CRREL Research Report 116, February 1966.
- /57/ Ramseier, R.O., Pavlak, T.L.:
Unconfined Creep of Polar Snow.
Journal of Glaciology, vol. 5, no. 39, 1964, p. 325 -
332.
- /58/ Reinwarth, O., Stichler, W.:
Ergebnisse von Akkumulationsuntersuchungen auf dem
Filchner-Ronne- und Ekstroem-Schelfeis, Antarktis.
13. Internationale Polartagung 1983 in Bamberg.
- /59/ Schytt, V.:
Glaciology II, Norwegian-British-Swedish Antarctic
Expedition 1949 - 1952.
Scientific Results, vol. IV, Oslo 1958.
- /60/ Steinemann, S.:
Experimentelle Untersuchungen zur Plastizität von Eis.
Beiträge zur Geologie der Schweiz. Hydrologie Nr. 10.
Bern: Kümmerly & Frey 1958.
- /61/ VDI-Wärmeatlas.
Düsseldorf: VDI-Verlag 1974.
- /62/ Vialov, S.S.:
Rheological Properties and Bearing Capacity of Frozen
Soils.
CRREL Report 1959.

- /63/ Wolfe, L.H.; Thieme, J.O.:
Physical and Thermal Properties of Frozen Soil and Ice.
Journal of the Society of Petroleum Technology, March
1964, p. 67 - 72.
- /64/ Yosida, Z.:
Physical Properties of Snow.
Ice and Snow. Conference Massacusettes 1962, p. 485 -
527.

10. Formelzeichen und Dimensionen

a	Temperaturleitfähigkeit	m^2/s
Bi	Biot-Zahl	-
C	Wärmekapazität	$J/kg^{\circ}C, J/m^3^{\circ}C$
d	Durchmesser der Ankerplatte	mm
D	Durchmesser der Eisplombe	cm
Fo	Fourier-Zahl	-
k	Durchlässigkeitskoeffizient	m/s
l	Verankerungslänge	m
l_A	Ankerlänge	m
m	Konstante	-
P	Belastung	kN
P_f	zulässige Belastung	kN
q	Wärmeenergie	J
$\dot{q}$	Wärmefluß	W
Q	Aktivierungsenergie	J/mol
r	Radius	m, cm
R	allgemeine Gaskonstante	$J/mol/^{\circ}C$
R_v	Reibungsverlust	%
t	Zeit	s, min, h, d
t_3	Zeit bis zum Versagen	s, min, h, d
T	Temperatur	$^{\circ}C, K$
T_G	Temperatur des Gemisches	$^{\circ}C, K$
U	Umfang der Ankerplatte	mm
V	Volumen	m^3
V_G	Volumen des Gemisches	l, m^3
α	Wärmeübergangskoeffizient	$W/m^2^{\circ}C$
ϵ	Verformung	mm
$\dot{\epsilon}$	Verformungsgeschwindigkeit	mm/s
ϵ_1	primäres Kriechen	mm
ϵ_2	sekundäres Kriechen	mm
ϵ_3	tertiäres Kriechen	mm
ϵ_m	Konstante	mm/s

η	dynamische Viskosität	mPas
λ	Wärmeleitfähigkeit	W/m ⁰ C
ν	Querdehnungszahl	-
ρ	Dichte	kg/m ³
σ	Druckspannung	N/mm ²
σ_c	Druckfestigkeit	N/mm ²
σ_t	Zugfestigkeit	N/mm ²
τ	Scherspannung	N/mm ²
τ_f	Kriechfestigkeit	N/mm ²
τ_m	Vergleichsspannung	N/mm ²

11. Lebenslauf

Name: Harald Brühl
Geburtsdatum: 23. Juli 1954
Geburtsort: Duisburg
Eltern: Franz Brühl und
Johanna, geb. Terhorst

schulische Ausbildung:

1961 - 1964	Kath. Volksschule Duisburg-Duissern
1964 - 1965	Kath. Volksschule Rheinberg
1965 - 1967	Mercator-Gymnasium Duisburg
1967 - 1973	Gymnasium Petrinum Recklinghausen

Studium:

1975 - 1981	Bauingenieurwesen an der Ruhr-Universität Bochum
-------------	--

Berufstätigkeit:

1.3. - 14.12.1981	Technischer Angestellter bei der Fa. Wiemer & Trachte Dortmund
seit 15.12.1981	Wissenschaftlicher Angestellter beim Lehrstuhl für Bauverfahrens- technik und Baubetrieb an der Ruhr-Universität Bochum

